

文章编号:1673-9469(2021)03-0013-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.003

## 水溶性聚合物强化砂土剪切强度及机理研究

张晨阳<sup>1</sup>, 喻永祥<sup>2,3</sup>, 闵望<sup>2,3</sup>, 白玉霞<sup>1</sup>, 刘瑾<sup>1\*</sup>, 魏世杰<sup>1</sup>, 李明阳<sup>1</sup>, 何承宗<sup>1</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018;

3. 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏 南京 2100018)

**摘要:** 针对加大砂土强度的问题, 采用水溶性聚合物对其进行改良, 对不同砂土干密度、固化剂含量及养护时间的改良砂土进行了直接剪切试验, 并对其黏聚力及内摩擦角进行分析。结果表明: 水溶性聚合物改良的砂土剪切强度得到一定程度地提高, 这是由于水溶性聚合物加固砂土试样, 形成包裹颗粒并相互联系的弹性黏膜, 从而增加了土体强度; 当养护时间一定时, 改良砂土的剪切强度随着固化剂含量增加而上升, 试样黏聚力最高可达 183.52 kPa; 当固化剂含量一定时, 改良砂土的剪切强度随着养护时间增加而增加, 试样黏聚力最高可达 200.19 kPa; 剪切强度的大小与固化剂含量、养护时间、试样干密度大小呈正相关。水溶性聚合物溶液在砂土中形成的弹性黏膜包裹砂粒, 填充砂土空隙, 进而增强土颗粒间的相互作用, 改善砂土的工程特性。

**关键词:** 砂土; 水溶性聚合物; 直剪试验; 剪切强度

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

## Experimental Study on Direct Shear Test of Sand Reinforced by Water-soluble Polymer

ZHANG Chenyang<sup>1</sup>, YU Yongxiang<sup>2,3</sup>, MIN Wang<sup>2,3</sup>, BAI Yuxia<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>1\*</sup>, WEI Shijie<sup>1</sup>, LI Mingyang<sup>1</sup>, HE Chengzong<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100; 2. Geological Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 3. Technology Innovation Center of Land (Cultivated Land)

Ecological Monitoring and Restoration Project of the Ministry of Natural Resources, Nanjing, Jiangsu 210018, China)

**Abstract:** In order to increase the strength of sand, water-soluble polymer was used to improve it. The direct shear test was carried out on the improved sand with different dry density, curing agent content and curing time, and the cohesion and internal friction Angle were analyzed. The results show that the shear strength of sand improved by water-soluble polymer is improved to a certain extent, which is due to the fact that water-soluble polymer strengthens sand samples and forms elastic mucosa wrapped with particles and connected with each other, thus increasing the strength of soil. When the curing time is constant, the shear strength of the improved sand increases with the increase of curing agent content. The maximum cohesion of the sample can reach 183.52 kPa. When the curing agent content is constant, the shear strength of the improved sand increases with the increase of curing time. The maximum cohesion of the sample can reach 200.19 kPa. The shear strength is positively correlated with curing agent content, curing time and dry density of the sample. Elastic mucosa formed by water-soluble polymer solution in sand wraps sand particles and fills sand voids, thus enhancing interaction between soil particles and improving engineering properties of sand.

**Key words:** sand; water-soluble polymer; direct shear experiment; shear strength

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 江苏省自然资源科技项目(KJXM2019028); 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心开放课题(2020)

作者简介: 张晨阳(1998-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事岩土体加固及灾害防治。

\* 通讯作者: 刘瑾(1983-), 女, 福建漳州人, 工学博士, 教授, 主要从事工程地质与环境岩土工程方面的研究。

因砂性土具有结构松散、粘性差、粘粒含量少的固有特性,极易引发各种地质灾害<sup>[1-2]</sup>。因此,对砂土进行改良一直以来都是科研人员十分关注的问题。改良砂土一般是在砂土中加入添加剂,以求增大土体强度。传统的无机类添加剂(包括水泥、石灰、粉煤灰等)通过与土颗粒表面物质进行反应,生成具有粘结作用的胶凝性物质,进而固化土体,改善土体的强度<sup>[3-5]</sup>。然而以此类方法加固的砂土脆性强,易产生开裂,且加固后的砂土不利于植被生长。高分子固化剂作为一种新型的化学加固土体方法,具有经济、运输便捷、使用方便、对环境影响小等优点、成为了岩土工程领域的一个研究热点。Bae等发现聚乙烯亚胺、聚丙烯酰胺和水性聚氧化乙烯对蒙脱石黏土矿物的粉尘污染具有较好的防治效果<sup>[6-7]</sup>。Rezaeimalek等通过室内试验研究了一种水分活化的液体聚合物对砂土强度的影响<sup>[8]</sup>。Marto等研究了TX-85 and SH-85添加物对红土工程特性与微观结构的影响<sup>[9]</sup>。Yang等通过老化试验研究了一种新型固砂剂的老化性能<sup>[10]</sup>。庄峰等在水泥砂浆中加入丙烯酸改性聚醋酸乙烯酯乳液(聚合物乳液),研究掺量对砂浆保水性、吸水率、黏结强度和压折比的影响,发现在砂浆中加入适量的聚合物乳液,可以明显改善砂浆性能<sup>[11]</sup>。董金梅等研究了聚丙烯酰胺和硅酸钠改性粉土力学特性,并分析了改良机理<sup>[12]</sup>。谏文武等研究了高分子材料SH(改性聚乙烯醇)对土体的抗崩解能力、抗冻融循环能力等的改善作用<sup>[13]</sup>。王银梅等利用SH型固化剂针对黄土进行改良并且得出结论,改良后的黄土抗剪强度增大、持水性增强、水稳性提高<sup>[14-16]</sup>。刘瑾等人针对聚氨酯型固化剂改良的砂土进行了单孔、多孔渗透试验,发现聚氨酯型固化剂可以提高砂土渗透能力<sup>[17-18]</sup>。上述研究表明,高分子聚合物可对砂土强度进行有效地提升。

本文采用水溶性聚合物加固砂土,通过直剪试验,研究不同固化剂含量、养护时间及试样干密度对砂土的影响,并结合高倍放大镜及扫描电镜对水溶性聚合物加固机理进行了深入分析。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

本试验所用土样取自新孟河常州武进区段,砂土风干并过2 mm的筛后级配如图1所示。砂土的最大、最小干密度分别为1.607和1.328 g/cm<sup>3</sup>,

砂土的有效直径 $d_{10}$ 为0.153 mm,不均匀系数 $C_u$ 为1.451,曲率系数 $C_c$ 为0.965。属于级配不良砂土。

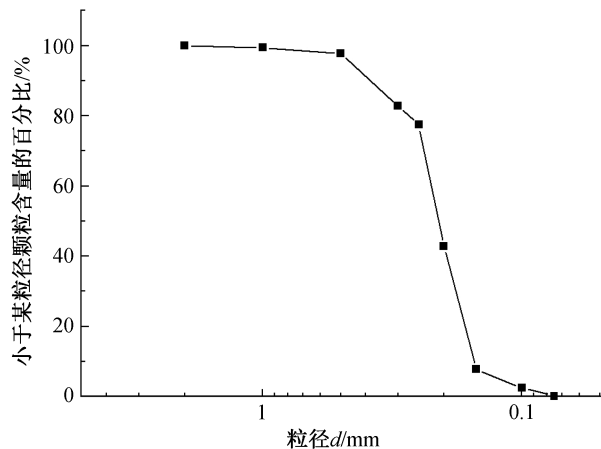


图1 砂土的粒径分布曲线

Fig. 1 The grain size distribution curve of sandy soil

试验中所采用水溶性聚合物以聚氨酯预聚体为主要成分,预聚体端基带有活跃的异氰酸基(-NCO),其制备原料为二元醇混合物和甲苯二异氰酸酯。该固化剂遇水生成水凝胶,可包裹砂土颗粒,增加颗粒间的相互作用力,填充颗粒间的孔隙,从而改变砂土的工程特性,其基本物理特性如表1所示。水溶性聚合物为浅黄色黏稠状液体,可以与水以任意比例互溶形成乳白色溶液,且溶液浓度越大,颜色越深、黏稠度越大,一段时间后形成固态弹性体,如图2所示。

表1 水溶性聚合物基本参数

Tab. 1 Basic parameters of water-soluble polymer

黏度 /(MPa·s)	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	固含量 /%	凝固时间 /s	水溶性
2	1.18	85	30~1 800	极好

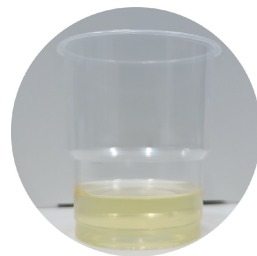


图2 水溶性聚合物

Fig. 2 Water-soluble polymer

### 1.2 试验方案

为研究固化剂含量在试验中的影响,根据不同试验的参数称取干密度分别为1.35、1.40、

1.45、1.5、1.55 g/cm<sup>3</sup>;选取的水溶性聚合物含量分别为0%、0.5%、1%、2%、3%、4%;养护时间分别为1、3、6、12、24、48、72 h。将固化剂与水进行混合搅拌至均匀,再将溶液倒入砂土中进行搅拌至均匀。将试样倒入直径61.8 mm的模具后压实,制成高20 mm的圆饼状见图3,在室温下养护相应的时间后进行直剪试验。

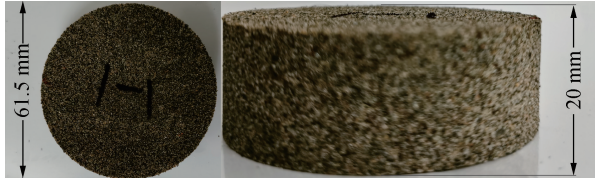


图3 直剪试样

Fig. 3 Direct shear sample

### 1.3 试验过程

试验前,测量养护后的质量,将试样放入仪器后盖透水石、加压盖,在100、200、300、400 kPa下分别对一组四个试样进行直剪试验,转速12 r/min。转盘每转一圈记录一次钢环读数。

通过直剪试验研究经过固化剂加固后改良砂性土的剪切性能。使用ZJ型应变控制直剪仪,测量正应力( $\sigma$ )分别为100、200、300、400 kPa下,剪切速率为12 r/min时的剪切应力-位移曲线。抗剪强度( $\tau$ )定义为剪切曲线峰值。无峰值时,取剪切位移4 mm所对应的剪应力。抗剪强度参数包括黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )由库仑抗剪强度定律计算,如公式(1)所示。

$$\tau_n = \sigma_n \times \tan\varphi + c \quad (1)$$

其中 $\tau_n$ (kPa)是剪切强度; $\sigma_n$ (kPa)是法向应力; $\varphi$ (°)是内摩擦角; $c$ (kPa)是黏聚力。黏聚力( $c$ )和内摩擦角( $\varphi$ )反映了材料本身的强度特性,只随材料的变化而变化。

试验结束后根据钢环读数绘制应力应变曲线,读取曲线的抗剪强度,计算各组试样的黏聚力及摩擦角。

## 2 试验结果分析及讨论

### 2.1 固化剂含量的影响分析

为研究加入不同含量固化剂后砂土的固结强度,选取干密度为1.45 g/cm<sup>3</sup>加入固化剂含量分别为0%、0.5%、1%、2%、3%、4%的砂土,进行直接剪切试验,荷载200 kPa的改良砂土试样养护48 h后的应力-应变曲线如图4所示。由图4可知固含量为0%、0.5%时应力-应变曲线呈应力硬化型,对

土体加固效果较差。固化剂含量达到1%之后,抗剪强度明显增大,残余强度略有增加。随着轴向应力的增加,轴向应变在0%到4%时快速增加,之后趋于平缓,达到峰值后轴向应力开始下降,在轴向应变为10%左右趋于稳定,得到试样的残余强度。并且改良砂土试样达到抗剪强度时的应变也逐渐增大,有轴向应变为5%增加到7%。由此可以证明固化剂的添加及固化剂含量的提高对砂土试样的改良效果显著。

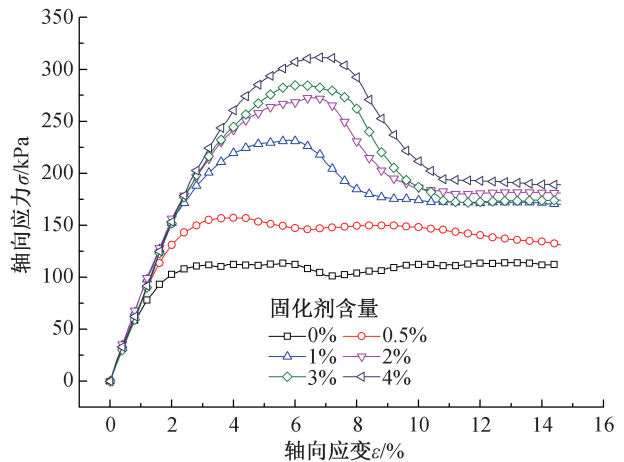


图4 荷载200 kPa改良砂土试样应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of sand sample modified with 200 kPa load

图5为养护6、48 h后改良砂土抗剪强度与固化剂含量关系曲线。如图5所示,对于干密度和养护时间相同的改良砂土试样,固化剂的使用可以明显提高砂土试样的抗剪强度,且其抗剪强度随着固含量的增加而增大。对于养护48 h,荷载400 kPa下的改良砂土固化剂含量从0%以1%增幅增加到4%分别为227.9、327.3、420.4、430.6、441.9 kPa,对于砂土试样的强化效果明显。

此外,如图5所示,在养护6 h的情况下,抗剪强度随着试样固含量的提升均匀提升。在养护48 h的情况下,固含量为0%~2%时试样的抗剪强度增加速率高于固含量为2%~4%时,这是因为在养护初期(6 h),由于时间较短,固化剂的高分子活性官能团与土颗粒表面的水并未充分反应,不能形成完整的弹性膜,固化剂的效果未完全发挥出来,对砂土的改良效果不明显。而在养护一段时间,固化剂相对凝固后,随着固化剂含量的提升,在固含量为0%~2%时加固效果明显提升,固含量超过2%之后固化剂所起的加固效果明显衰减。可见对于此种砂土存在最优固化剂含量。

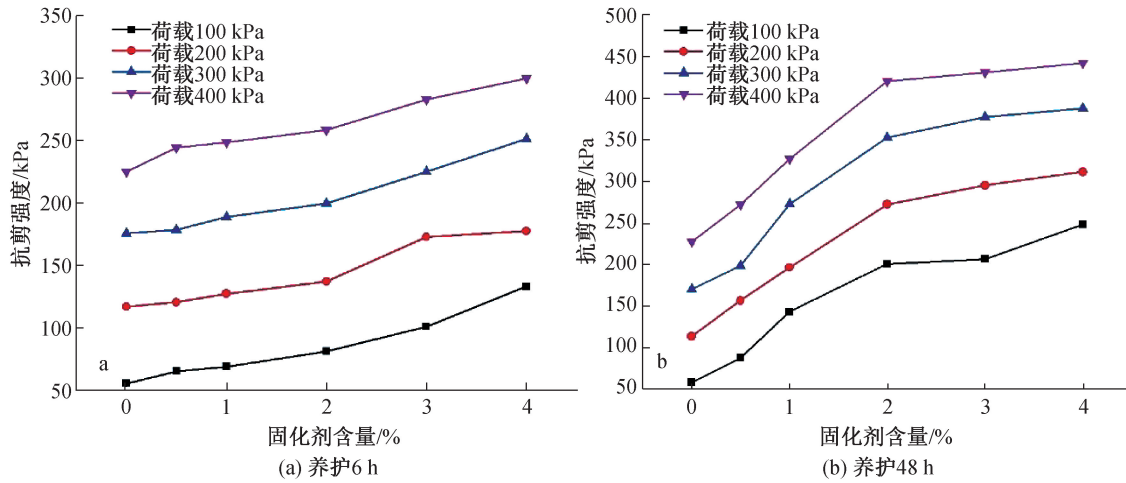


图5 固化剂含量对抗剪强度的影响

Fig. 5 Effect of curing agent on shear strength

表2为6种固含量改良砂土在养护6、48 h后,所得黏聚力及内摩擦角。图6为养护6、48 h后,改良砂土试样的黏聚力及内摩擦角与固含量的关系曲线。

如图6所示,对于干密度和养护时间相同的改

良砂土试样,固化剂含量的提升试样黏聚力明显提高。结合表2及图6可知,养护6 h 固化剂含量为4%的试样黏聚力比0%的提升70.85 kPa,约89倍;养护48 h 固化剂含量为0.5%的试样黏聚力比0%的提升161.48 kPa,约7.3倍。说明固化剂对

表2 不同固化剂含量下改良砂土试样的黏聚力及内摩擦角

Tab.2 Cohesion and internal friction angle of modified sand samples under different curing agents

固化剂含量/%	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	养护6 h	养护48 h	养护6 h	养护48 h
0	0.79	22.03	29.66	29.41
0.5	2.77	31.16	30.84	30.63
1	7.78	78.53	31.08	32.08
2	19.90	127.03	30.83	36.43
3	45.34	139.25	31.00	36.97
4	71.65	183.52	29.95	33.27

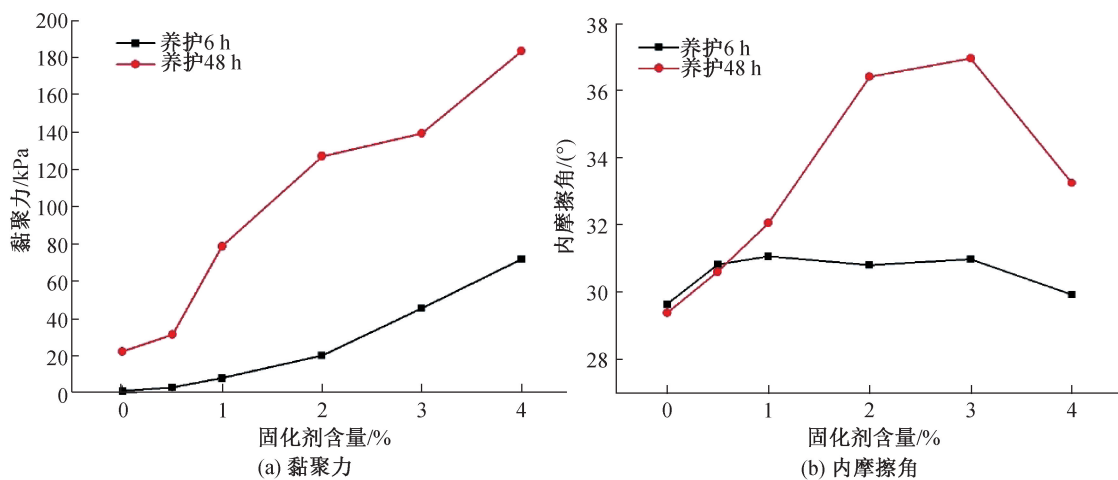


图6 黏聚力及内摩擦角与固含量的关系曲线

Fig. 6 The relation curve of cohesion and internal friction angle with curing agent content

试样黏聚力有明显地提升。由图 6 可知,养护 6 h 试样黏聚力随固化剂含量的增大增长速率略有上升,但相较于养护 48 h 增长速率较小。同样是因为养护 6 h 的固化剂未完全发挥作用,对黏聚力的强化作用有限。养护 48 h 试样在固化剂含量 0%~2% 有大幅度提升,固化剂含量在 2%~4% 时增长幅度较小,说明对此类砂土的黏聚力而言也存在最优固含量。

养护 6 h 和 48 h 试样的内摩擦角均在固化剂含量为 3%~4% 时明显下降。说明固化剂含量超过 3% 之后对试样中砂土颗粒的包裹过饱和,致使存在多余的固化剂充填于砂土颗粒之间,使颗粒与颗粒的接触减小,内摩擦角减小。

### 2.2 养护时间的影响分析

为研究加入固化剂养护不同时间后砂土的固结强度,选取干密度  $1.45 \text{ g/cm}^3$  加入 0%、1%、3% 固化剂后养护时间分别为 1、3、6、12、24、48、72 h 的改良砂土,进行直接剪切试验。

图 7 为固化剂含量为 0%、1%、3% 的改良砂土抗剪强度与养护时间关系曲线。由图 7 可以看

出,在固化剂含量为 0% 时的砂土试样在养护时间从 1 h 到 6 h 的抗剪强度不断增大,6 h 之后抗剪强度几乎不变。说明此类砂土在养护 6 h 后试样水分基本挥发完,砂土抗剪强度不再随时间改变而改变。

固化剂含量为 1% 的改良砂土试样同样也在养护 1 h 到 6 h 期间抗剪强度不断增大,在 6 h 到 12 h 期间,抗剪强度没有明显地增大,12 h 之后抗剪强度继续增大,但增长幅度明显小于 1 h 到 6 h 抗剪强度增长量。

表 3 为改良砂土试样养护不同时间后,所测得的黏聚力及内摩擦角。图 8 为改良砂土试样的黏聚力及内摩擦角与养护时间的关系曲线。

由表 3 及图 8 可知,固化剂含量 0% 试样的黏聚力几乎不变,固化剂含量 1%,养护 72 h 后的改良砂土试样的黏聚力比养护 1 h 提高了 129.84 kPa,约 37.87 倍;固化剂含量 3%,养护 72 h 后的改良砂土试样的黏聚力比养护 1 h 提高了 167.01 kPa,约 5 倍。由此可以看出,固化剂的添加使得砂土黏聚力有了明显地提高。

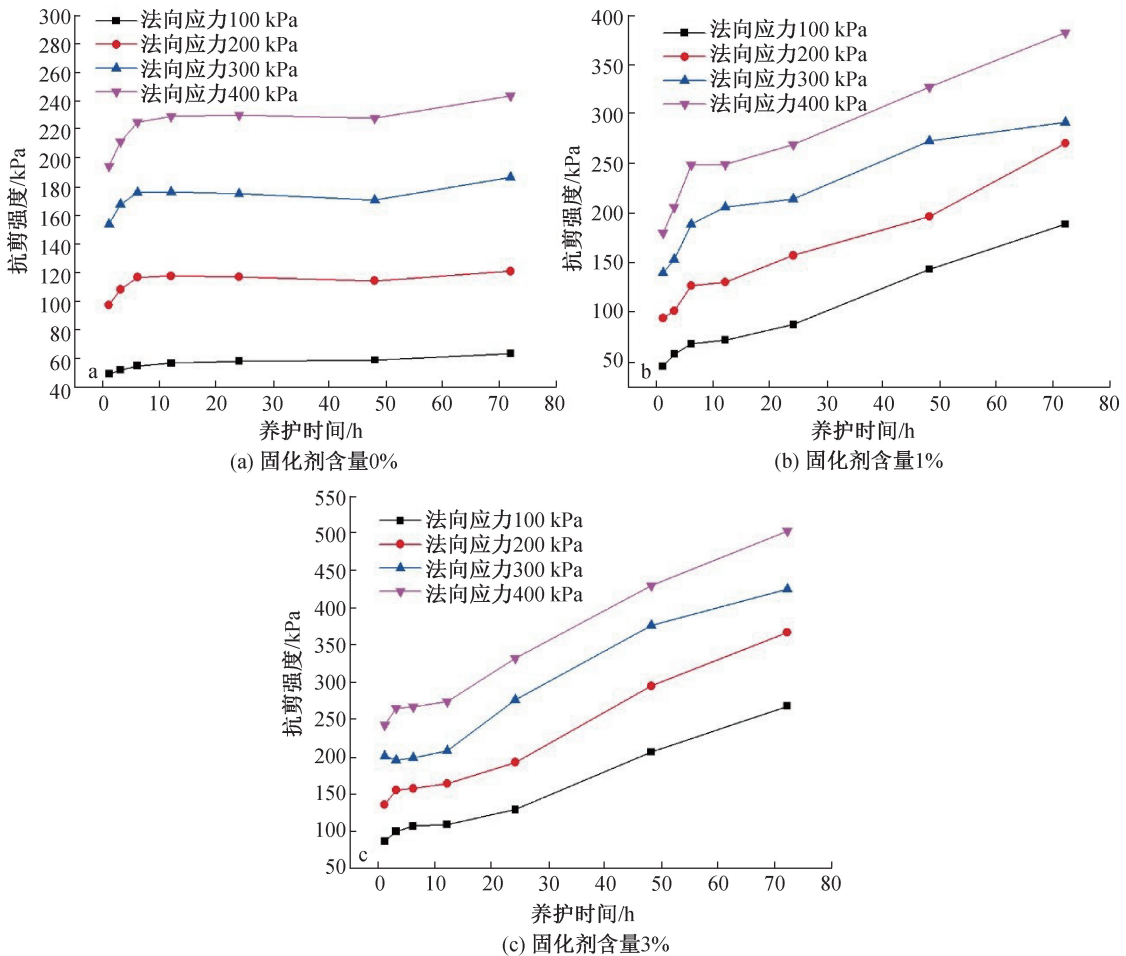


图 7 养护时间对抗剪强度的影响

Fig. 7 Effect of curing time on shear strength

表3 不同养护时间下改良砂土试样的黏聚力及内摩擦角

Tab.3 Cohesion and internal friction angle of modified sand samples under different curing time

养护时间/h	黏聚力/kPa			内摩擦角/(°)		
	0%	1%	3%	0%	1%	3%
1	0.59	3.42	33.18	26.22	24.12	28.09
3	0.64	6.15	45.18	28.24	26.35	28.23
6	0.79	7.78	52.69	29.66	31.08	27.48
12	1.17	13.09	54.00	29.90	31.26	28.36
24	1.62	32.20	59.47	29.83	31.01	34.73
48	2.03	78.52	139.25	29.41	32.08	36.97
72	2.31	133.27	200.19	31.17	31.00	37.39

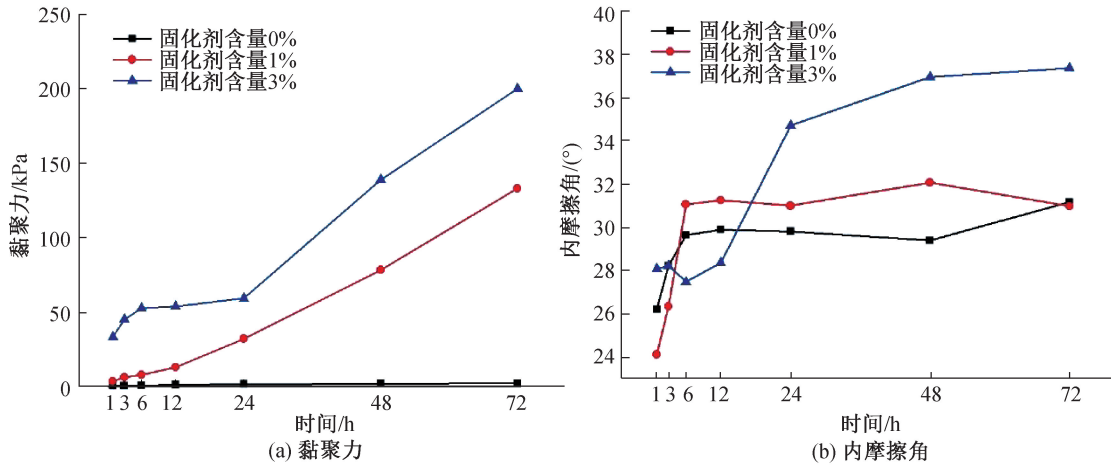


图8 黏聚力及内摩擦角与养护时间的关系曲线

Fig. 8 The relation curve of cohesion and internal friction angle with curing time

同时,由图8可以看出固化剂含量为1%试样黏聚力不断增大,且增长幅度不断升高。固含量为3%的试样黏聚力在6h到24h基本不变。是因为固化剂的添加使得试样黏聚力提升,固含量为1%的试样固化剂相对较少,发挥作用较快;而固含量为3%的试样固化剂相对较多,砂土颗粒间固化剂数量较多,需要更长时间发挥作用。

另外,随着时间的推移,砂土试样的内摩擦角都有所提升,固含量为0%及1%的砂土试样在养护12h后内摩擦角便基本不变,固含量1%的砂土试样内摩擦角基本大于固含量为0%的砂土试样内摩擦角。固含量为3%的砂土试样内摩擦角在1h到12h均低于其他两项,24h后明显大于其他两项,是因为固化剂中水分未完全挥发时的固化剂对砂土试样的颗粒仍有润滑作用,反而降低了试样的内摩擦角,随着时间的推移,固化剂中水分挥发,固化剂发挥作用,使得内摩擦角提升。固化剂含量越高,开始发挥作用的时间也越晚,所以固含量为3%的改良砂土试样在1h到12h持续低于固含量为0%的砂土试样。

### 2.3 试样干密度的影响分析

为研究加入不同干密度砂土加入固化剂后的固结强度,选取干密度分别为1.35、1.40、1.45、1.5、1.55的砂土分别加入含量0%、1%、3%的固化剂养护48h后,进行直接剪切试验。

图9为不同干密度的改良砂土试样,固含量为0%、1%、3%养护48h后的抗剪强度。由图9可以看出对于固化剂含量0%的试样,抗剪强度随着干密度增大有小幅度增大,改良试样的抗剪强度随着干密度的增大而波动上升,对于固含量为1%的改良砂土试样,干密度为 $1.45 \text{ g/cm}^3$ 时对砂土的加固效果较好;对于固含量为3%的改良砂土试样,干密度为 $1.45 \text{ g/cm}^3$ 时对砂土的加固效果较差。

表4为不同干密度的砂土加入0%、1%、3%的固化剂养护48h后,进行直剪试验所测得不同压强下的黏聚力及内摩擦角。图10为固化剂含量为0%、1%、3%,养护48h后改良砂土的黏聚力及内摩擦角与干密度的关系曲线。

结合表4及图10可以看出,随着干密度的增

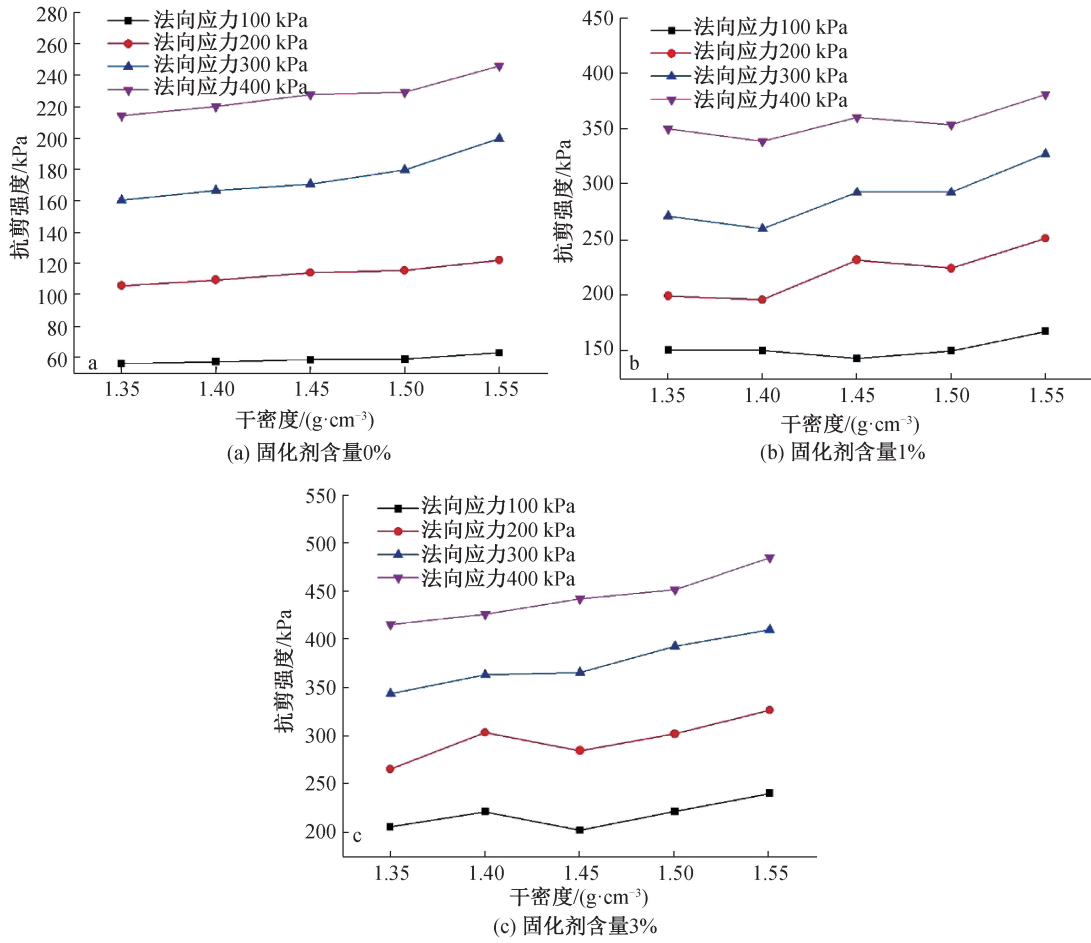


图 9 干密度对抗剪强度的影响

Fig.9 Effect of dry density on shear strength

表 4 不同干密度下改良砂土试样的黏聚力及内摩擦角

Tab. 4 Cohesion and internal friction angle of modified sand samples under different dry density

干密度 / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力/ $\text{kPa}$			内摩擦角/ $(^\circ)$		
	0%	1%	3%	0%	1%	3%
1.35	2.02	75.36	130.35	27.89	31.28	35.34
1.40	2.26	79.00	160.13	29.66	32.16	33.98
1.45	2.03	78.84	123.32	29.41	35.49	38.72
1.5	2.47	85.38	146.55	29.86	34.20	38.06
1.55	1.44	102.94	160.92	32.03	35.58	39.30

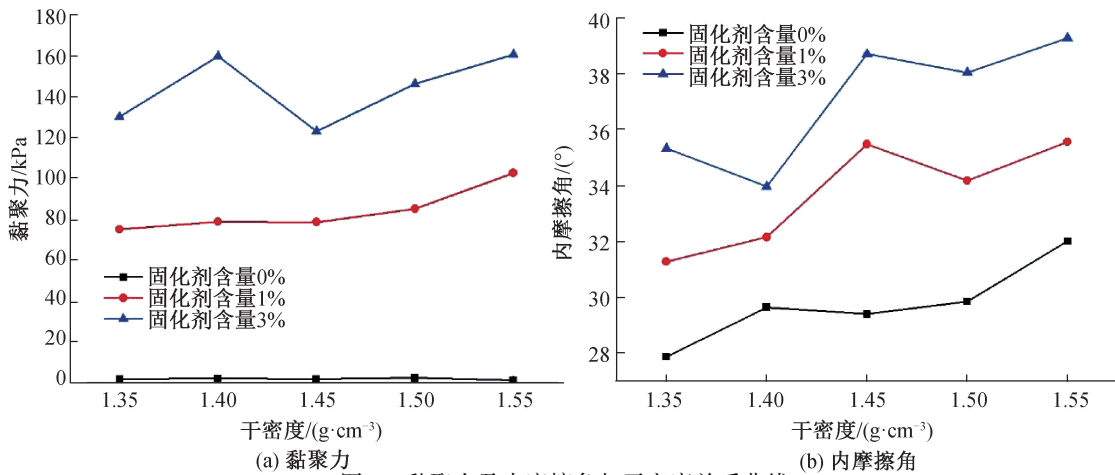


图 10 黏聚力及内摩擦角与干密度关系曲线

Fig. 10 The relation curve of cohesion and internal friction angle with dry density

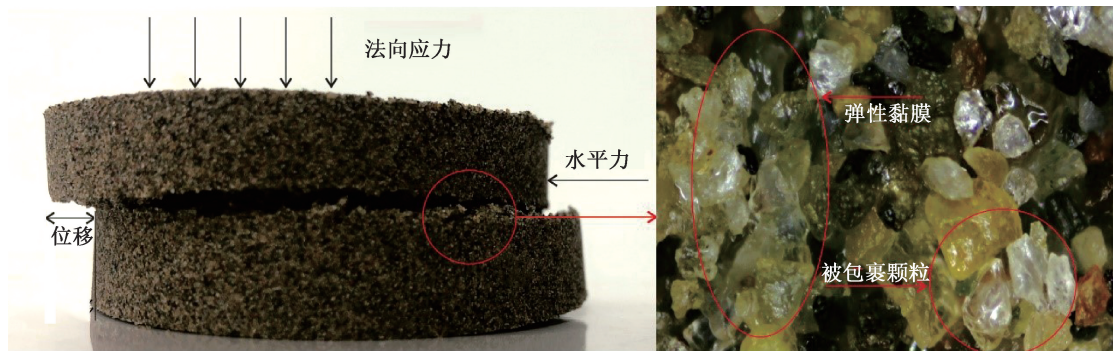


图 11 改良砂土试样及放大 135 倍后部分截图

Fig. 11 The improved sand sample with the screenshot after 135 times magnification

大试样的黏聚力及内摩擦角均有一定程度地增大,其中固化剂含量 0% 的试样黏聚力几乎不变;固化剂含量 1% 的试样黏聚力增幅较小;固化剂含量 3% 的试样黏聚力在干密度  $1.45 \text{ g/cm}^3$  时较小。由此可以看出,试样干密度的增加对试样黏聚力增强有一定效果,对于固含量为 3% 的改良砂土试样,干密度在  $1.45 \text{ g/cm}^3$  时的黏聚力效果不佳。另外,对于砂土试样的内摩擦角,随着干密度的增加波动上升,改良砂土内摩擦角均在干密度  $1.45 \text{ g/cm}^3$  时最高。

### 3 机理分析

水溶性聚合物为一种聚合物,由于所拥有的亲水基团长链使得其可以与水进行任意比例地混合互溶,反应过后的溶液容易与砂土进行混合,经过搅拌均匀后一部分溶液包裹砂土颗粒,另一部分溶液填充于砂土空隙。而经过一段时间的养护,试样中的水分逐渐挥发,固化剂溶液逐渐凝固成固态,更牢固地包裹住砂土,使得试样的黏聚力及内摩擦角大幅度提高。图 11 为固含量 4%,养护 48 h 后剪切破坏的试样及其破坏面放大 135 倍后的部分截图。从图 11 可以看出加入固化剂后直剪试样剪切面与上下底面存在夹角,破坏面不平整,说明固化剂的添加对砂土试样起到加固作用。从放大截图中可以看出,固化剂包裹砂土颗粒并形成相互联系的弹性黏膜,从而形成一种稳定的结构,减小了砂土之间的空隙,增强了试样的黏聚力。

图 12 为改良砂土的扫描电镜图片,从图 12 中可以看出,固化剂可以很好地包裹砂土颗粒,使砂土颗粒间存在紧密的联系,颗粒之间的弹性黏膜可以很好地固定颗粒的位置,使试样的强度得到提高。

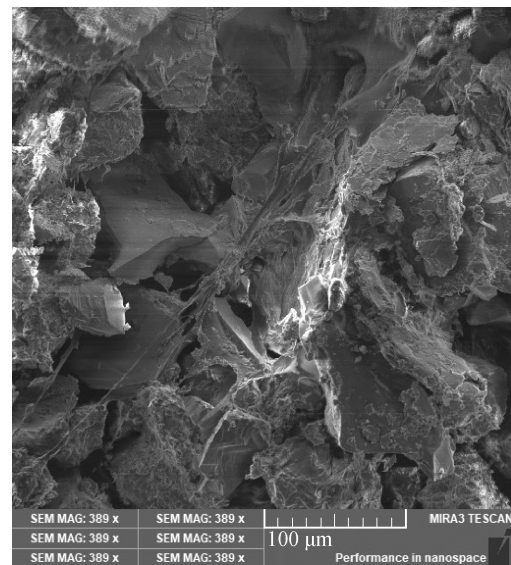


图 12 改良砂土的扫描电镜图片

Fig. 12 Scanning electron microscope photograph of improved sand

固化剂含量越高,砂土的颗粒之间胶结地也更为牢靠。对于低含量的试样,固化剂的有无及多少占主导地位,若存在固化剂,且固化剂越多,颗粒的胶结情况就越好。随着固化剂含量提高,固化剂更多填充于颗粒间的孔隙,对抗剪强度的增强作用不大,从而出现增强幅度不大的现象。而固化剂含量再次增加使得颗粒间相互接触的地方也被固化剂填充,形成固化剂包裹颗粒的状态,从而使得试样抗剪强度再次提高。同时,试样的黏聚力及内摩擦角也得到提升。

养护时间越长,试样中的水分挥发就越多。在最开始的几个小时内水分挥发使得固化剂溶液固结成固态,使试样抗剪强度、黏聚力及内摩擦角迅速提高,随着时间推移,试样外侧水分逐渐挥发完全,内部水分挥发越来越慢,试样的抗剪强度增幅也就越来越小,内摩擦角基本不再改变,24 h 后

内部水分几乎挥发完全,试样整体的抗剪强度及黏聚力再次大幅提高。

试样干密度的增加使得同样体积内颗粒的数目增多,颗粒与颗粒之间排列更为紧密,固化剂相同的情况下可以更好地包裹颗粒,并在颗粒之间形成更为牢靠的弹性黏膜,使得颗粒抗剪强度,黏聚力及内摩擦角都有一定程度地提高。

#### 4 结论

本文使用水溶性聚合物对砂土进行加固,通过直接剪切试验研究了固化剂含量,养护时间及试样干密度对试样抗剪强度的影响,得出以下结论:

1) 固化剂对砂土的剪切强度有显著的作用,可以大幅度提高砂土的抗剪强度、黏聚力及内摩擦角,并且随着固化剂含量的提高而不断提高,试样黏聚力最高可达 183.52 kPa;固化剂含量在 1%~2% 范围附近对试样抗剪强度有明显提升,之后随着固化剂含量的提升,抗剪强度增幅减缓。

2) 养护时间增加对剪切强度的提高也有显著地影响,在最开始的几个小时内随着时间的推移,试样的抗剪强度黏聚力及内摩擦角有大幅度提升,之后试样的抗剪强度增幅减慢,内摩擦角基本不再改变,至试样内水分挥发完全后试样的抗剪强度及黏聚力达到最大。试样黏聚力最高可达 200.19 kPa。

3) 试样的剪切强度随试样的干密度呈波动上升关系,干密度越大试样的抗剪强度、黏聚力及内摩擦角越强。

4) 水溶性聚合物溶液在砂土中形成的弹性黏膜包裹砂粒,填充砂土空隙,进而增强土颗粒间的相互作用,进而强化试样的抗剪强度、黏聚力及内摩擦角。

#### 参考文献:

[1] 李萍,张波,李同录.黄土高原边坡特征与破坏规律的分  
区研究[J].地球科学与环境学报,2012,34(03):89-98.  
[2] 刘瑞华,孙宁,唐光良.广东滑坡灾害的地质环境与致  
灾因素分析[J].热带地理,2010,30(01):13-17.  
[3] 陈涛,顾强康,郭院成.石灰、水泥、粉煤灰改良膨胀土  
对比试验[J].公路,2008(6):164-167.  
[4] PHAN T A, PHAM N A. Improvement in Engineering  
Properties of Soft-soil Using Cement and Lime Additives;  
A Case Study of Southern Vietnam[J]. IOP Conference  
Series Earth and Environmental Science, 2018, 143(1):

012039.

- [5] CHEN F. Strength and Deformation Characteristics of Ba-  
salt Fiber Cement-soil at Early Age[J]. Journal of Shen-  
zhen University Science and Engineering, 2017, 34(6):  
611-617.  
[6] BAE S, INYANG H I. Effects of Various Polyethylenimine  
Solutions on Desiccation of Na-Montmorillonite [J]. Soil  
and Sediment Contamination: An International Journal,  
2001,10(6):675-685.  
[7] BAE Sunyoung, INYANG Hilary I, DE BRITO Galvão T  
C, et al. Soil Desiccation Rate Integration into Empirical  
Dust Emission Models for Polymer Suppressant Evaluation  
[J]. Journal of Hazardous Materials,2006,132(1):111-117.  
[8] SEPEHR Rezaeimalek, HUANG Jie, SAZZAD Bin-  
Shafique. Evaluation of Curing Method and Mix Design of a  
Moisture Activated Polymer for Sand Stabilization [J].  
Construction and Building Materials,2017,146:210-220.  
[9] AMINATON Marto, NIMA Latifi, AMIN Eisazadeh. Effect  
of Non-Traditional Additives on Engineering and Micro-  
structural Characteristics of Laterite Soil [J]. Arabian  
Journal for Science and Engineering,2014,39(10):6949-  
6958.  
[10] YANG Jun, WANG Fang, LI Fang, et al. The Effects of  
Aging Tests on a Novel Chemical Sand-fixing Agentpolyas-  
partic Acid [J]. Composites Science and Technology,  
2006,67(10):2160-2164.  
[11] 庄峰,张方英,杜江勇,等.丙烯酸改性聚醋酸乙烯酯  
乳液对砂浆性能的影响[J].石河子大学学报:自然科  
学版,2012,30(03):381-385.  
[12] 董金梅,朱华,边疆,等.高分子材料改性粉土力学特  
性试验研究及机制探讨[J].岩石力学与工程学报,  
2014,33(Z2):4326-4333.  
[13] 谌文武,张起勇,刘宏伟,等.高分子材料 SH 渗透加固  
遗址土的效果研究[J].工程地质学报,2017,25(05):  
1307-1313.  
[14] 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(Z2):2883-2887.  
[15] 王银梅,杨重存,谌文武,等.新型高分子材料 SH 加固  
黄土强度及机理探讨[J].岩石力学与工程学报,2005  
(14):2554-2559.  
[16] 胡乾亮,王银梅,江长通. SH 固化黄土的土-水特征曲  
线试验[J].水电能源科学,2016,34(01):128-130+135.  
[17] 刘瑾,亓孝辉,张达,等.聚氨酯型固化剂改良表层砂  
土抗渗透特性试验[J].地球科学与环境学报,2017,  
39(01):126-134.  
[18] 刘瑾,冯巧,孙少锐,等.聚氨酯型固化剂加固砂性土  
抗压试验及破坏模式[J].地球科学与环境学报,2017  
(05):124-130.

(责任编辑 王利君)