

DOI:10.11766/trxb201807090330

水玻璃和玻璃纤维联合改良砂质黏性紫色土抗剪强度研究*

周超云¹ 汪时机^{1†} 李 贤^{1, 2} 胡东旭¹ 黄 伟¹ 何丙辉²

(1 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

(2 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘 要 为探究水玻璃、氯化钙与玻璃纤维联合作用对砂质黏性紫色土抗剪强度的影响, 进行了不固结不排水三轴室内试验, 探讨了不同质量分数的水玻璃溶液和氯化钙溶液(两种溶液质量分数为1:1)、不同质量分数的纤维以及两种溶液和纤维联合作用对土体强度的影响。结果表明: 水玻璃溶液和氯化钙溶液的作用使内摩擦角逐渐增大, 黏聚力变化不明显。土体中掺入纤维后, 黏聚力显著增大, 内摩擦角也逐步增加, 当纤维掺量为0.8%时, 黏聚力达到最大。当在质量分数均为20%的两种溶液改良土中掺入纤维时, 在溶液和纤维共同作用下, 土体的偏应力曲线随着纤维含量的增大而逐渐上升, 黏聚力进一步增大, 至纤维掺量为0.8%时达到最大, 而内摩擦角变化幅度微弱。土体的黏聚力和内摩擦角是其颗粒结构性和抗侵蚀性的重要指标, 研究结果可为砂质黏性紫色土地区通过改良土防治水土流失的方法提供科学依据。

关键词 水玻璃; 氯化钙; 玻璃纤维; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号 TU411 **文献标识码** A

土体强度对边坡、路基的稳定性至关重要, 水土的保持亦是如此。长久以来, 改良土体一直是科研及工程人员不断追求的目标。对于不满足工程要求的土, 通常会对其采取夯实、压密、置换土层的方式, 随着科学研究的深入, 改良加固土体的方式日益丰富。如曲涛等^[1]利用水泥砂浆固化淤泥质土, 发现了加固效果最佳时所需的掺砂量。吕擎峰等^[2]利用石灰粉、煤灰、水玻璃联合加固硫酸盐渍土, 取得较好的加固效果。张雁等^[3]使用石灰、煤矸石改良膨胀土, 发现膨胀土的塑性、击实性及抗剪性能明显得到改善。传统的改良方法效果良好但污染较大。近20年来, 纤维加筋技术逐步

兴起, 我国自20世纪90年代初陆续出现了关于纤维加筋土(Fiber reinforced soil)的研究^[4-6], 取得了一系列成果, 如魏丽等^[7]研究麦秸秆纤维加筋海滨盐渍土, 发现纤维加筋土的黏聚力 c 大幅度提高, 且土体的抵抗变形能力得到了提升。璩继立等^[8]研究了棕榈丝与麦秸秆丝加筋上海地区黏土, 发现这两种材料均可以改善土的抗剪强度和抗变形性能, 且棕榈纤维加筋优于麦秸秆丝。国外学者Yetimoglu等^[9-10]根据研究指出, 在砂土中掺入纤维可明显提高土体的残余抗剪强度, 且土的承载力随着纤维含量的增加而逐渐提升。Mohamed^[11]研究发现, 随着土体中纤维含量的增加, 土体

* 国家自然科学基金项目(11572262, 41771312)、中央高校基本业务费专项资金(XDJK2018AB003)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 11572262, 41771312), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. XDJK2018AB003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shjwang@swu.edu.cn

作者简介: 周超云(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事土力学方面的研究.E-mail: 2252788258@qq.com

收稿日期: 2018-07-09; 收到修改稿日期: 2018-11-08; 优先数字出版日期: 2018-11-20

的抗剪强度也在逐渐提升，但当掺量达到1%时，抗剪强度开始下降。当然，除了化学改良和物理加筋的方式外，其他加固方式也在逐步兴起，如近几年出现的微生物加固技术(microbial-induced calcite precipitation, 简称为 MICP)，利用微生物诱导生成碳酸钙胶结物，固化松散土体。由于此种加固方式较为绿色、环保，日益受到广大学者的关注^[12-13]。

传统的土壤改良加固中常用到水泥，但水泥生产被认为是造成全球变暖重要因素之一^[14-15]。因此本次试验使用水玻璃($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)和氯化钙(CaCl_2)与玻璃纤维联合加固土体。水玻璃是一种使用广泛的化学注浆材料，其成本低、无毒、适用性好^[16-19]。对于水玻璃固化地层的机理，国内外诸多学者进行了研究^[20-23]，目前的认识是：水玻璃与加入的反应剂(如石灰、粉煤灰)反应，生成硅酸凝胶，继而在土颗粒间及表面形成胶凝薄膜，将土颗粒胶结并填充土中孔隙与裂隙，加强土颗粒的联结，从而达到增强土体强度的效果。而玻璃纤维具有抗拉强度大、吸水性小、耐酸碱等优点，且其价格低廉^[24]。相比于聚丙烯纤维，玻璃纤维加固土体方面的研究不多，因此开展对水玻璃和氯化钙溶液与玻璃纤维联合加固土体的研究具有重要的工程意义。

重庆地区的紫色土是由侏罗系沙溪庙组的紫色砂泥岩在频繁的风化作用和侵蚀作用下发育形成的一种砂质黏性紫色土，原生矿物主要为石英和长石，黏粒矿物成分主要包括蒙脱石、蛭石和高岭石，土体具有一定的湿胀干缩特性，容易在环境干湿交替作用下产生裂隙。经室内基本物理性质实验测定，其粒径全部小于2 mm，且粒径在1~0.05 mm的颗粒含量占73.48%，按中国土壤质地分类属于砂土；但同时，其塑性指数为14.8，又属于黏性土；按照土壤学分类，试验用土属于侏罗系沙溪庙组紫色砂泥岩发育而成的紫色土；所以，结合土的工程分类，将其定义为砂质黏性紫色土(sandy clayey purple soil)。重庆紫色土地区容易发生浅层滑坡和水土流失灾害。由于该土广泛分布于川渝两地，极具川渝特色，但在工程领域的研究颇少，鉴于该土较易发生地质灾害，研究紫色土的改良显得尤为迫切。

本文进行了不同配比的水玻璃、氯化钙和玻

璃纤维的强度试验以及两种溶液和纤维联合改良土体的剪切试验，得到了素土、两种溶液改良土、纤维加筋土以及两种溶液和纤维联合改良土的剪切数据，通过分析对比，探讨了水玻璃、氯化钙和玻璃纤维联合改良土体的强度变化特征。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

本次试验用土为砂质黏性紫色土，取自重庆缙云山下西南大学实验农场，取土深度为地表至以下50 cm左右，基本物理参数见表1；玻璃纤维购自上海臣启化工科技有限公司，基本参数见表2；氯化钙和九水偏硅酸钠均为产自天津市致远化学试剂有限公司的实验分析纯。主要试验仪器为英国进口的GDS饱和土三轴仪，其主要操作方法是：先将制备好的土样放置底座上，两端各贴上一个与试样相同大小的铜粉烧结成的透水石，安装好试样帽，盖上压力室，拧上螺栓，而后往压力室注满纯净水，然后，通过电脑软件，将各个数据清零，再来设定试验围压、轴向应变和剪切时间，点击开始后，电脑自动记录、处理数据。其优点是精度较高(轴向应力最大可达3 MPa，精度为0.000 1 kPa,应变可以精确到0.01 mm)，数据的记录、计算由电脑软件控制，可以减少工作量及人为误差。

1.2 试验方案

将土碾碎、过筛，取小于2 mm的土放入电热恒温鼓风干燥箱中，烘箱温度调至110℃，待24 h土烘干、冷却后，称取一定量的烘干土，配制试验用土。在制备素土样的过程时，称取一定量的土样，而后用喷壶均匀撒入纯净水，并将土拌匀，直至目标含水率；在制备溶液改良土样的过程中，先称取一定量的土，算出达到目标含水率时所需纯净水的量，而后将该纯净水量一分为二，一部分用于制备 CaCl_2 溶液，另一部分用于制备 Na_2SiO_3 溶液($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 中所含结晶水在制备溶液时为自由水)，在制备 Na_2SiO_3 溶液时，加入微量的NaOH，以防其水解。制备好溶液后，先均匀喷洒 CaCl_2 溶液，将土拌匀后密封养护24 h后，再将刚制备好的 Na_2SiO_3 溶液均匀撒入样土中，喷洒溶液时需翻动、拌匀土样，以确保溶液反应完全；在制备纤维土的过程时，先称取一定量的土，按照与干

土质量百分比撒入对应量的纤维，而后与干土拌匀，再用喷壶均匀撒水，直至目标含水率；制备溶液与玻璃纤维联合改良土样的过程中，先按照制备纤维土的过程制备样土，而后再喷洒CaCl₂溶液，将土养护24 h后，再喷洒Na₂SiO₃溶液，并拌合均匀。制备好土样后，将其装入密封袋中养护48 h。

养护结束后，将土分五层倒入制样器内，用压实装置将土制成50 mm × 100 mm的试样。各组试

样的初始含水率均为18%，干密度为1.60 g·cm⁻³，每组三个试样。各组试样的处理参数如表3所示。制完试样后，用保鲜膜将试样包裹，装入密封袋，放入保湿缸，在室内室温条件下养护7d。养护完成后，采用GDS饱和土三轴仪对其进行不固结不排水剪切，试验围压为100 kPa、200 kPa、300 kPa。剪切速率为0.828 mm·min⁻¹，破坏标准按照峰值强度或15%轴向应变确定^[7]。

表1 试验土的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of the test soil

天然含水率 Moisture content/%	比重 Specific gravity	液限 Liquid limit/%	塑限 Plastic limit/%	塑性指数 Plasticity index	不均匀系数 Nonuniform coefficient	曲率系数 Coefficient of curvature
20.78	2.69	34.30	19.50	14.80	20.10	0.70

表2 玻璃纤维的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of glass fiber

直径 Diameter/ μ m	长度 Length/mm	密度 Density/(g·cm ⁻³)	拉伸强度 Tensile strength /(GPa)	弹性模量 Elasticity modulus /(GPa)	断裂伸长率 Elongation at break /%	分散性 Dispersiveness
17	12	2.70	2.18	87.20	2.52	极好

表3 试样的试验参数

Table 3 Test parameters of the sample

组别 Group	干密度 Dry density /(g·cm ⁻³)	天然含水率 Moisture content/%	硅酸钠 Na ₂ SiO ₃ /%	氯化钙 CaCl ₂ /%	玻璃纤维 Glass fiber/%
A0	1.60	18	0	0	0
B0	1.60	18	5	5	0
B1	1.60	18	10	10	0
B2	1.60	18	15	15	0
B3	1.60	18	20	20	0
C0	1.60	18	0	0	0.2
C1	1.60	18	0	0	0.4
C2	1.60	18	0	0	0.6
C3	1.60	18	0	0	0.8
C4	1.60	18	0	0	1.0
D0	1.60	18	20	20	0.2
D1	1.60	18	20	20	0.4
D2	1.60	18	20	20	0.6
D3	1.60	18	20	20	0.8
D4	1.60	18	20	20	1.0

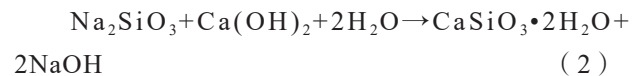
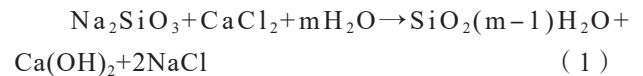
2 结果与讨论

2.1 Na_2SiO_3 溶液和 CaCl_2 溶液的添加量对强度指标的影响

为分析硅酸钠 Na_2SiO_3 溶液和氯化钙 CaCl_2 溶液的百分含量对抗剪强度指标的影响，选取A0、B0、B1、B2、B3组数据进行分析，得到黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值，详见表4。

图1是不同质量分数的 Na_2SiO_3 溶液和 CaCl_2 溶液与黏聚力的关系曲线，图2是 Na_2SiO_3 溶液和 CaCl_2 溶液以1:1的质量分数改良时的内摩擦角的关系曲线，图中可以看出试样的黏聚力和内摩擦角均是随着溶液百分含量的增大而有所提高，其中，

黏聚力增长的比较缓慢，而内摩擦角则增大的较为明显，相比于A0组的素土，B3组溶液改良土的黏聚力增幅较小，而内摩擦角却增加了71.80%。其原因是 Na_2SiO_3 溶液和 CaCl_2 溶液发生双水解反应，生成了硅酸凝胶、氢氧化钙及氯化钠，以及少量的 Na_2SiO_3 与生成的微溶物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液发生反应生成了水合硅酸钙和氢氧化钠。反应方程式如下：



式中， m 为系数，根据反应条件、状态确定。

表4 两种溶液改良土的强度指标

Table 4 Strength indices of the soil modified with the mixture of the two solutions

组别 Group	硅酸钠 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\%$	氯化钙 $\text{CaCl}_2/\%$	玻璃纤维 Glass fiber/ $\%$	黏聚力 Cohesion c/kPa	内摩擦角 Internal friction angle $\varphi/^\circ$
A0	0	0	0	67.27	11.42
B0	5	5	0	67.83	13.58
B1	10	10	0	68.19	16.45
B2	15	15	0	68.55	17.71
B3	20	20	0	69.72	19.62

其主要加固机理是：经过 Na_2SiO_3 溶液和 CaCl_2 溶液的相互作用和养护后，土体中生成大量的硅酸凝胶（ $\text{SiO}_2(m-1)\text{H}_2\text{O}$ ）与微量的水合硅酸钙（ $\text{CaSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）凝胶，而凝胶是一种致密体，生成后随即黏附于土颗粒表面，逐渐成长，最终完全包裹土颗粒而使土颗粒逐步变大，堵塞土中缝隙，进而对试样进一步填充，从而使得土样更加密实，

增强了土颗粒之间的相互挤压。另一方面，生成的硅酸凝胶及水合硅酸钙凝胶围绕着土颗粒逐渐成长，其胶凝作用使土颗粒逐步团聚，最终将紧邻的土颗粒联结在一起，加强了土颗粒之间的联系，间接地增强了土颗粒间的咬合能力，因此内摩擦角增大。但由于养护时间不足，硅酸凝胶和水合硅酸钙的胶结作用发挥不充分，因而黏聚力增长的不明

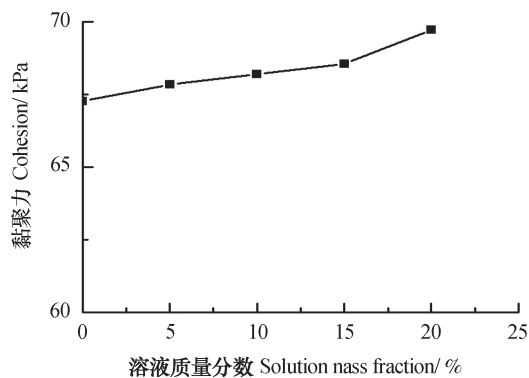


图1 两种溶液（1:1）作用对黏聚力的影响

Fig.1 Effects of the mixture of the two solutions (1:1) on cohesion

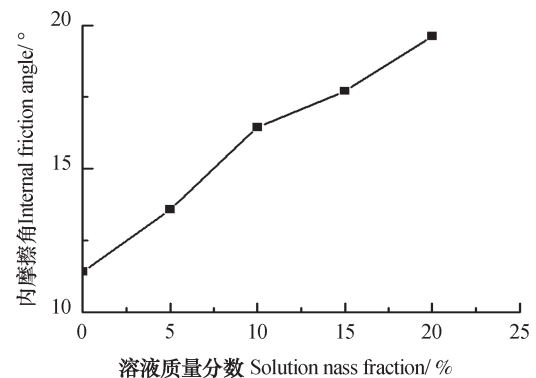


图2 两种溶液（1:1）作用对内摩擦角的影响

Fig.2 Effect of the mixture of the two solutions (1:1) on internal friction angle

显。且生成的硅酸凝胶和水合硅酸钙未完全硬化，其本身的强度未充分发挥。

2.2 纤维掺量对强度指标的影响

为分析玻璃纤维含量对抗剪强度指标的影响，

试验选出A0、C0、C1、C2、C3组数据，经分析，得到在控制干密度、含水率的条件下，玻璃纤维的百分含量对强度指标的影响，详细的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值见表5。

表5 纤维土的强度指标

Table 5 Fiber soil strength index

组别 Group	硅酸钠 Na ₂ SiO ₃ /%	氯化钙 CaCl ₂ /%	玻璃纤维 Glass fiber/%	黏聚力 Cohesion c /kPa	内摩擦角 Internal friction angle φ /°
A0	0	0	0	67.27	11.42
C0	0	0	0.2	77.65	13.65
C1	0	0	0.4	81.24	14.35
C2	0	0	0.6	95.77	15.52
C3	0	0	0.8	98.93	16.08
C4	0	0	1.0	96.74	15.95

从图3中可以看出，在控制干密度、含水率及在不加入Na₂SiO₃溶液和CaCl₂溶液的条件下，随着玻璃纤维百分含量的增加，黏聚力一直在增长，相比于素土组A0，纤维土的黏聚力均大于素土，纤维掺量为0.8%时，纤维土黏聚力达

到最大，相比于素土，黏聚力提高了47.06%。由图4中可知，随着纤维百分含量的增加，内摩擦角 φ 不断增大，当掺量为0.8%时，内摩擦角达到最大，当掺量超过0.8%后，内摩擦角变化不明显。

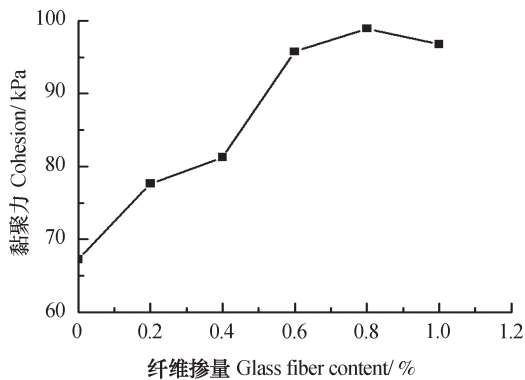


图3 纤维掺量对黏聚力的影响

Fig. 3 Effect of addition rate of the fiber on cohesion

其主要加固机理是：土中加入纤维后，细小的纤维丝被紧紧挤压在土颗粒间，与土颗粒交织在一起，相互交错、搭接，形成了诸多的纤维网，因此，增强了对土颗粒的约束能力，一定程度上限制土颗粒的自由移动，间接地增加了土的内聚力。当土体受到压应力而发生形变时，由于土中纤维能够承受较大的拉应力，因此，纤维的掺入极大地增强

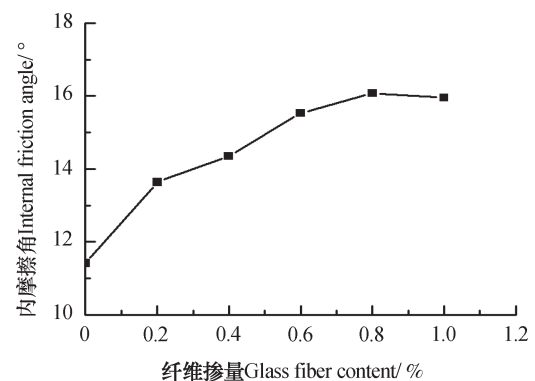


图4 纤维掺量对内摩擦角的影响

Fig. 4 Effect of addition rate of the fiber on internal friction angle

了土体的抵抗变形的能力，使得土体与纤维协调变形，共同承受压应力，提高了土体的整体性，因此黏聚力增加，但当纤维掺量超过0.8%时，由于土中纤维含量过多，导致大量的土颗粒被分隔开，土颗粒之间的相互作用减弱，因而黏聚力减小。内摩擦角逐步增大的原因可能是土样剪切面上的纤维分布与剪切方向不平行，一定程度上增大了土颗粒与

纤维之间的咬合摩擦力，但是，当纤维掺量超过0.8%时，由于过多的土颗粒被纤维分隔开，导致土颗粒间的咬合作用减弱，一定程度上抵消了部分土颗粒与纤维之间的咬合摩擦力。

2.3 Na_2SiO_3 溶液、 CaCl_2 溶液和玻璃纤维联合改良土的应力-应变关系

溶液纤维复合土在不同纤维掺量、不同围压下的应力-应变关系与素土的比较见图5a~图5c。从图5a~图5c中可以看出，在3个围压下，溶液、纤维联合改良土的偏应力曲线均在素土偏应力曲线之上，当轴向应变小于1%时，各曲线偏应力增长迅速，但各曲线相差不大，当轴向应变大于1%时，随着轴向应变的增加，偏应力曲线间距逐步增大，这说明当应变很小时，纤维的作用未完全发挥，故对偏应力的影响较小，纤维的加筋作用只有在稍大一点的轴向应变时才能发挥出来。且从纤维加筋溶液改良土的曲线来看，在相同的轴向应变时，随着纤维含量的增加，偏应力明显增大，曲线的斜率 k 也在逐渐增大，当两种溶液的

质量分数为20%，纤维掺量为0.8%，轴向应变为15%时，D3组的偏应力均大于其他组的偏应力，纤维加筋溶液改良土的曲线斜率 k 均大于素土，即 $k_{D3} > k_{D2} > k_{D4} > k_{D1} > k_{D0} > k_{A0}$ ，且在围压为100 kPa时，纤维加筋溶液改良土组D3的偏应力为443.73 kPa，较素土增长了112.29%，当纤维超过0.8%时，偏应力逐步减小。其主要原因是：一方面，土样经过溶液改良后，生成的硅胶凝胶和水合硅酸钙填充了土样的孔隙，使土样更加密实。另一方面，玻璃纤维具有较大抗拉强度，当轴向应变稍大一点时，纤维能够将土颗粒紧紧包裹。随着轴向应变的增大，纤维的加筋作用发挥的愈加明显，因此产生相同的轴向应变时，纤维加筋土能够承受更大的压应力。且溶液和纤维联合作用时，由于土样更加密实，土颗粒与纤维的接触愈发紧密，极大的增强二者协调变形的能力。当纤维掺量超过0.8%时，过多的纤维积聚在一团，阻断了土颗粒的联系，减弱了土颗粒间的引力，降低了试样的均匀性和整体性，导致偏应力减小。

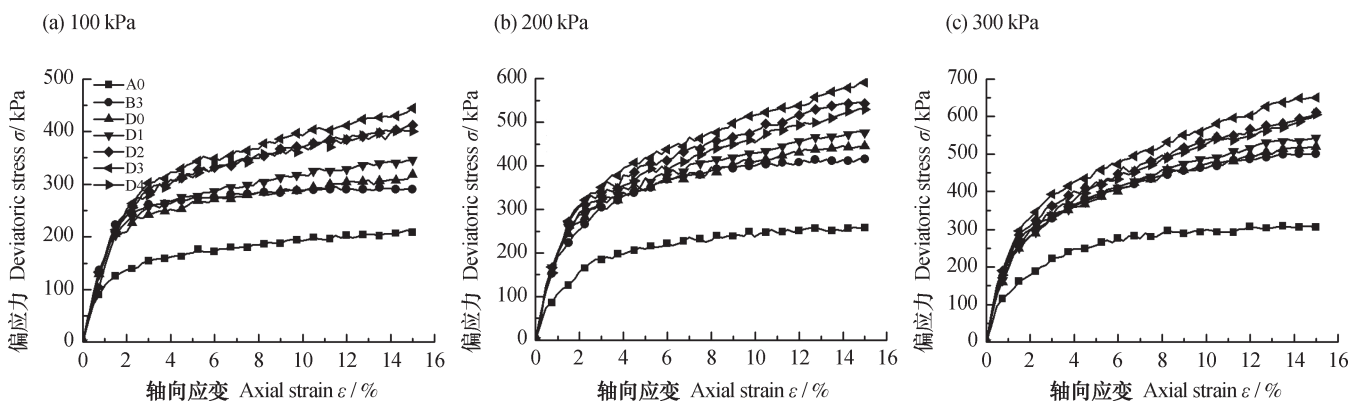


图5 不同围压下偏应力与轴向应变的关系曲线

Fig. 5 Relationship between deviatoric stress and axial strain under different confining pressure

2.4 Na_2SiO_3 溶液、 CaCl_2 溶液和玻璃纤维联合作用对强度指标的影响

为了分析在 Na_2SiO_3 溶液、 CaCl_2 溶液及玻璃纤维联合作用对试样抗剪强度指标的影响，试验选取A0、B3、D0、D1、D2、D3、D4组作为对照试验组，经过数据分析，得出以下几组试样的强度指标，详见表6。

结合表6、图6~图7可以看出，在控制干密度为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，含水率为18%时，素土的黏聚力略低于质量分数为20%的溶液改良土，而溶液改良土

的黏聚力低于溶液、纤维复合改良土，且随着纤维掺量的增加，纤维加筋溶液改良土的效果愈发显著，当纤维掺量达到0.8%时，加筋效果最优，纤维加筋改良土的黏聚力相比于20% Na_2SiO_3 溶液和20% CaCl_2 溶液作用时增大了72.39%，较素土提升了78.67%，当纤维超过0.8%后，改良土的黏聚力显著下降。而溶液、纤维复合改良土的内摩擦角较两种溶液单独作用时变化不大。

其主要机理是：经过20% Na_2SiO_3 溶液、20% CaCl_2 溶液初步改良后，生成的硅胶凝胶和水

表6 添加两种溶液和纤维后的强度指标

组别 Group	硅酸钠 Na ₂ SiO ₃ /%	氯化钙 CaCl ₂ /%	玻璃纤维 Glass fiber/%	黏聚力 Cohesion c/kPa	内摩擦角 Internal friction angle φ/°
A0	0	0	0	67.27	11.42
B3	20	20	0	69.72	19.62
D0	20	20	0.2	76.6	19.60
D1	20	20	0.4	87.85	19.30
D2	20	20	0.6	111.44	19.35
D3	20	20	0.8	120.19	19.83
D4	20	20	1.0	104.32	19.82

合硅酸钙颗粒填充了土样的孔隙和裂隙,使土样变得更加密实,进一步增加了纤维与土颗粒的接触面积,从而增大了土颗粒对纤维的挤压,且硅酸凝胶和水合硅酸钙的胶结作用进一步加强了纤维与土颗粒之间的黏结,增强了纤维限制土颗粒移动的作用以及土颗粒与纤维协调变形的能力,使得土样的整体性得到提高,因此黏聚力进一步提升。当纤维掺量超过0.8%后,过多的纤维将大量的土颗粒分隔开,土颗粒间的引力大大减弱从而导致黏聚力减小。而纤维加筋溶液改良土的内摩擦角较两种溶液

单独作用时变化不大,其原因可能是纤维的掺入并未改变土颗粒的粗糙程度,且由于土样更加密实,土颗粒与纤维协调变形的能力大大提升,土样的整体性得到提高,因此,土样内部的剪切面开展的并不明显,因而与剪切面相交的纤维和土颗粒之间的咬合摩擦作用没有充分发挥。但当纤维含量超过0.8%时,纤维与土颗粒间的接触面积虽然增加,但过多的纤维阻断了土颗粒的咬合,且易抱团,降低了试样的均匀性和整体性,导致内摩擦角未增加。

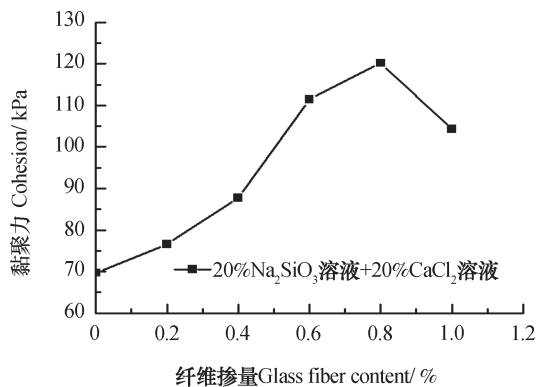


图6 纤维掺量对溶液(1:1)改良土黏聚力的影响
Fig. 6 Effect of addition rate of the fiber on cohesion of the soil already modified with the two solution(1:1)

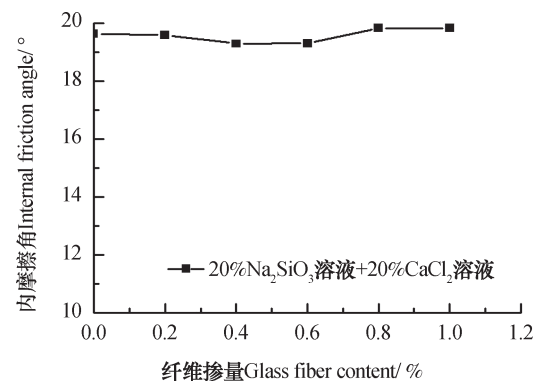


图7 纤维掺量对溶液(1:1)改良土内摩擦角的影响
Fig. 7 Effect of addition rate of the fiber on soil internal friction angle of the soil already modified with the two solutions(1:1)

3 结论

在砂质黏性紫色土中加入Na₂SiO₃溶液和CaCl₂溶液后,能有效提高土体的内摩擦角,对黏聚力的效果不明显。随着Na₂SiO₃溶液和CaCl₂溶液的质量百分数的增大,土体的内摩擦角逐渐增大;在土中

掺入一定量的玻璃纤维,能够有效提高土体的黏聚力,随着玻璃纤维掺量的增大,加筋效果也愈发明显,当纤维达到0.8%时,其加筋效果最好,黏聚力增加了47.06%。同时,土体的内摩擦角也随着纤维掺量的增大而逐渐提升,但当纤维掺量大于0.8%时,内摩擦角变化不明显;在质量分数为

20%Na₂SiO₃溶液和20%CaCl₂溶液改良后的砂质黏性土中掺入玻璃纤维后, 通过实验结果可以看到, 溶液、纤维联合加固土的偏应力和黏聚力明显大于溶液改良土和素土。当轴向应变大于1%, 随着纤维含量的增大, 溶液、纤维联合加固土的偏应力和黏聚力逐渐增大, 其增长速率也在逐渐增加, 且均大于素土, 即 $k_{D3} > k_{D2} > k_{D4} > k_{D1} > k_{D0} > k_{A0}$ 。且轴向应变为15%时, 质量分数为20%的溶液和0.8%的纤维联合改良土(D3组)的效果最好, 偏应力明显大于其他组。而内摩擦角与溶液单独改良时相差不大。研究表明, 溶液、纤维联合改良的效果要优于溶液单独改良, 相比于素土, 黏聚力提升巨大, 内摩擦角也有一定的提升。

参 考 文 献

- [1] 曲涛, 范晓秋, 刘鑫. 水泥砂浆固化土抗压强度特性试验. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 173—179
Qu T, Fan X Q, Liu X. Compressive strength characteristics of cement mortar stabilized soil (In Chinese). Journal of Hohai University (Natural Science), 2012, 40(2): 173—179
- [2] 吕擎峰, 申贝, 王生新, 等. 水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究. 岩土力学, 2016, 37(3): 687—693
Lü Q F, Shen B, Wang S X, et al. Study on strength characteristics and curing mechanism of water-saturated sulfated saline soil (In Chinese). Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 687—693
- [3] 张雁, 康雪成, 郭利勇. 石灰煤矸石改良膨胀土工程特性研究. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2720—2724
Zhang Y, Kang X C, Guo L Y. Study on engineering characteristics of expansive soil modified with lime coal gangue (In Chinese). Chinese Bulletin of Silicate, 2015, 34(9): 2720—2724
- [4] 李广信, 陈轮, 郑继勤, 等. 纤维加筋粘性土的试验研究. 水利学报, 1995(6): 31—36
Li G X, Chen L, Zheng J Q, et al. Experimental study on fiber reinforced geosynthetic soils (In Chinese). Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 1995(6): 31—36
- [5] 介玉新, 李广信. 纤维加筋土计算方法的研究. 土木工程学报, 1999, 32(5): 51—55
Jie Y X, Li G X. Study on calculation method of fiber reinforced soil (In Chinese). China Civil Engineering Journal, 1999, 32(5): 51—55
- [6] 介玉新, 李广信. 纤维加筋粘性土边坡的模型试验和计算分析. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(11): 25—28
Jie Y X, Li G X. Model test and computational analysis of fiber reinforced clay soil slope (In Chinese). Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(11): 25—28
- [7] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度与偏应力应变. 土木工程学报, 2012, 45(1): 109—114
Wei L, Chai S X, Cai H Z, et al. Shear strength and deviatoric stress and strain of coastal saline soil reinforced by wheat straw (In Chinese). China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 109—114
- [8] 璩继立, 俞汉宁, 江海洋, 等. 棕榈丝与麦秸秆丝加筋土无侧限抗压强度比较. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1216—1220
Zhai J L, Yu H N, Jiang H Y, et al. Comparison of unconfined compressive strength of palm silk and wheat straw fiber reinforced soil (In Chinese). Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1216—1220
- [9] Yetimoglu T, Salbas O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. Geotextiles and Geomembranes, 2003, 21(2): 103—110
- [10] Yetimoglu T, Inanir M, Esatinanir O. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(2): 174—183
- [11] Mohamed A E M K. Improvement of swelling clay properties using hay fibers. Construction and Building Materials, 2013, 38: 242—247
- [12] 崔明娟, 郑俊杰, 章荣军, 等. 化学处理方式对微生物固化砂土强度影响研究. 岩土力学, 2015, 36: 392—396
Cui M J, Zheng J J, Zhang R J, et al. Effect of chemical treatment methods on the strength of microbe-cured sands (In Chinese). Rock and Soil Mechanics, 2015, 36: 392—396
- [13] 邵光辉, 尤婷, 赵志峰, 等. 微生物注浆固化粉土的微观结构与作用机理. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 129—135
Shao G H, You T, Zhao Z F, et al. Microstructure and action mechanism of microbiological grouting solidified silt (In Chinese). Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(2): 129—135

- [14] Cayan D R, Bromirski P D, Hayhoe K, et al. Climate change projections of sea level extremes along the California coast. *Climatic Change*, 2008, 87 (S1): 57—73
- [15] Dejong J T, Mortensen B M, Martinez B C, et al. Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 2010, 36 (2): 197—210
- [16] 杜嘉鸿, 秦明武, 肖荣久. 国外化学灌浆教程. 北京: 中国水利水电出版社, 1987
Du J H, Tai M W, Xiao R J. A foreign course of chemical grouting (In Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 1987
- [17] 刘嘉材. 化学注浆. 北京: 中国水利水电出版社, 1987
Liu J C. Chemical grouting (In Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 1987
- [18] 坪井直夫. 化学灌浆法的实际应用. 吴永宽译. 北京: 煤炭工业出版社, 1980
Keisuke T. Practical application of chemical grouting method (In Chinese). Wu Y K trans. Beijing: Coal Industry Press, 1980
- [19] 朱纯熙, 卢晨, 季敦生. 水玻璃砂基础理论. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 16—34
Zhu C X, Lu C, Ji D S. Basic theory of water glass sand (In Chinese). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000: 16—34
- [20] 贺行洋, 陈益民, 张文生, 等. 膨胀土化学固化现状及展望. *硅酸盐学报*, 2003, 31 (11): 1101—1106
He X Y, Chen Y M, Zhang W S, et al. Status quo and prospect of chemical solidification of expansive soils (In Chinese). *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, 31 (11): 1101—1106
- [21] 肖尊群, 刘宝琛, 乔世范, 等. 碳酸钙-酸性水玻璃注浆材料对比试验. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2010, 41 (6): 2305—2312
Xiao Z Q, Liu B C, Qiao S F, et al. Contrast experiment of calcium carbonate-acidic water glass grouting material (In Chinese). *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41 (6): 2305—2312
- [22] 尹亚雄, 王生新, 韩文峰, 等. 加气硅化黄土的微观结构研究. *岩土力学*, 2008, 29 (6): 1629—1633
Yin Y X, Wang S X, Han W F, et al. Microstructure of aerated silicified loess (In Chinese). *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29 (6): 1629—1633
- [23] Kazemian S, Prasad A, Huat B B K, et al. Influence of cement-sodium silicate grout admixed with calcium chloride and kaolinite on sapric peat. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011, 17 (3): 309—318
- [24] 宋金岩, 孙红, 葛修润, 等. 玻璃纤维加筋土强度特征试验研究. *中外公路*, 2012, 32 (5): 261—264
Song J Y, Sun H, Ge X R, et al. Experimental study on strength characteristics of glass fiber reinforced soil (In Chinese). *Chinese and Foreign Highways*, 2012, 32 (5): 261—264

Shearing Strength of Sandy Clayey Purple Soil Reinforced with Sodium Silicate and Glass Fiber in Combination

ZHOU Chaoyun¹ WANG Shiji^{1†} LI Xian^{1,2} HU Dongxu¹ HUANG Wei¹ HE Binghui²

(1 College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract 【Objective】Purple soil, a kind of sandy cohesive soil developed from purple sandy mudstone of the Shaximiao Formation of the Jurassic under frequent weathering and erosion, is widely distributed in regions of Chongqing and Sichuan. It is prone to disasters, such as shallow landslides and soil erosion. Purple soil is closely related to engineering construction, but at present there are few researches in the engineering field paying attention to any engineering properties of purple soil. In view of the fact that the soil is prone to geological disasters, it is particularly urgent to study how to reinforce purple soil in construction projects. Though the traditional cement reinforcement is not bad in effect when compared with other reinforcement ways, it will bring about damages to the soil sources. For instance, once reinforced with cement, the soil can never be used again for plant cultivation. In recent years, a novel soil reinforcing

technology has emerged and is going to be more and more popular because it is environment-friendly and very good in effect on improving soil strength. Therefore, this study was conducted to explore effect of the use of a mixture of sodium silicate solution, calcium chloride solution and glass fiber on shearing strength of the soil relative to ratio of the three components. 【 Method 】 an experiment was conducted in a triaxial chamber that can keep the material therein free from consolidation and drainage, to explore effect of the mixture on soil shearing strength, relative to ratio of the mixture. In the mixture sodium silicate solution and calcium chloride solution, set as 1:1 in ratio, was blended with glass fiber varying in addition rate. 【 Result 】 Results show that sodium silicate solution and calcium chloride solution acted jointly to gradually increased internal friction angle of the soil, but did not affect much its cohesion. When fiber was added in, cohesion significantly increased, and internal friction angle did too, though gradually. When fiber was added alone at a rate of 0.8%, Cohesion of the soil was maximized. When fiber was blended with the soil already treated with the two kinds of solutions at a rate of 20%, deviatoric stress curve of the soil rose gradually with rising glass fiber addition rate, and cohesion of the soil further increased too till fiber addition rate reached 0.8%, however internal friction angle of the soil did not very much. 【 Conclusion 】 As cohesion and internal friction angle of a soil are two important indicators of granular structure and erosion resistance of the soil, the research is expected to be able to serve as a scientific basis for control of soil erosion in sand-clayey purple soil areas though modification of the soil.

Key word Sodium silicate; Calcium chloride; Glass fiber; Shearing strength; Cohesion; Internal friction angle

(责任编辑：檀满枝)