

改性水玻璃加固细砂室内试验研究

艾振喜¹, 徐厚庆¹, 亢佳伟², 邓国华^{2,3}

(1. 中交一公局第三工程有限公司, 北京 100102;

2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

3. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 为了探讨磷酸改性水玻璃对工程中细砂层加固的可行性和有效性, 在合理确定改性水玻璃配合比的基础上, 利用无侧限压力仪和直剪仪对加固砂样的应力应变关系及抗剪强度开展研究, 分析改性水玻璃溶液对细砂层的加固效果和机理。试验结果表明: 磷酸改性的水玻璃溶液对细砂具有明显加固作用, 最优体积配合比为水: 磷酸: 水玻璃 = 13: 1: 3.3。每 1 m³ 改性水玻璃可固结素砂最大约 4 m³。固砂体的轴向抗压强度随时间增长呈现先增大后减小的趋势, 无侧限抗压强度处于 140 kPa ~ 213 kPa 范围, 凝结时间为 42 h 时, 抗压强度达到最大。较原状细砂, 加固初期黏聚力可增加 6 kPa ~ 28 kPa, 内摩擦角有所降低; 随着凝结时间的增加, 黏聚力逐渐减小而内摩擦角有所恢复。

关键词: 改性水玻璃; 磷酸; 松散砂层; 溶液配合比; 抗剪强度; 应力-应变曲线

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)05-0033-08

Laboratory Test on Fine Sand Reinforcement with Modified Sodium Silicate

AI Zhenxi¹, XU Houqing¹, KANG Jiawei², DENG Guohua^{2,3}

(1. The Third Engineering Division of Of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Xi'an Loess Underground Project Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: This study aims to evaluate the feasibility and effectiveness of using phosphoric acid to modify water glass reinforcement in engineering. Initial experiments determined the optimum mixing ratio of the modified solution, which was then used to test reinforced sand samples using unconfined pressure gauges and direct shear gauges. In addition, the reinforcement effect and mechanism of the modified water glass solution on fine sand layers were investigated. The results show that treatment with phosphoric acid modified aqueous glass solution can significantly improve the strength of fine sand soil. The optimum volume ratio for practical engineering use was found to be 13: 1: 3.3 for water, phosphoric acid and water glass, respectively. In addition, the solution demonstrated the ability to solidify up to 4 cubic meters of plain sand per cubic meter through simulated permeability experiments. When the unconfined compressive strength is in the range of 140 kPa ~ 213 kPa and the setting time is 42 hours, the compressive strength reaches its maximum. The compressive strength of the sand consolidation bodies initially increases and then decreases over time. The use of reinforcement can increase the initial cohesion by 6 kPa ~ 28 kPa compared to undisturbed fine sand while reducing the internal friction angle to a suitable level.

Keywords: modified sodium silicate; phosphoric acid; loose sand layer; solution mixture ratio; shear strength; stress-strain curve

在地下隧道修建过程中,不可避免地会遇到松散砂层,地层中砂粒组成成分为单体矿物颗粒,颗粒结构具有无黏性、无塑性、磨圆度较好的特点^[1],在外荷载的作用下很容易发生塌落或剪切变形,稳定性很差。因此实际工程中需要对砂层进行必要的加固措施以满足施工要求。

砂层的加固问题自出现以来已有大量学者进行了相关研究,并取得了显著的成果^[2-3]。在这些研究中,注浆法因其具有材料成本较低,实际操作简单,工程应用效果好等优点在加固砂土方面得到了广泛研究和应用^[4-5]。近年来,随着社会进步和科技发展,研究者在注浆材料和工艺方面投入大量时间和精力,推出了众多的新材料和新工艺^[6-8]。其中,水玻璃溶液具有粘稠度低,可灌性好,结合力强等特点,能够有效改善砂土性能,起到加固作用,仍然是注浆材料研究中的主要使用对象。由于直接采用水玻璃溶液进行注浆加固存在固化不完全,强度低,稳定性差,浆液易流失等现象。因此对于水玻璃溶液的改性研究具有理论和实际意义^[9]。

水玻璃溶液的改性可主要分为碱性溶液型水玻璃和中性-酸性溶液型水玻璃两类。其中,碱性溶液型水玻璃存在脱水收缩和腐蚀等现象,存在耐久性差、固化强度低的问题,并未在地下工程中得到应用。酸性水玻璃溶液具有凝胶时间可调、耐久性好和造价低等特点^[10-12],相较于水泥浆、水泥-水玻璃等浆液,在粉细砂层内部具有扩散能力强、入渗效果好的优点,即便是在低压力下,也可保证注浆效果,在细砂类地下工程建设过程中得到了广泛应用。在以往研究过程中,周云定等^[5]针对粉细砂层地层磷酸-水玻璃浆液的可注性、材料选择和适宜浆液配比参数开展了一系列的研究工作,在新建京张铁路草帽山隧道中得到应用;曹留金等^[13]针对不同硫酸、水玻璃浆液配比下的稠度、pH 及胶凝时间开展了研究工作,并在神朔线某风积粉细砂层铁路隧道中得到了应用。张连震等^[14]以青岛地铁 2 号线中含黏性土砂层为加固对象,重点讨论黏性土含量对砂层压密加固效果(c 、 φ 和 k)的影响规律;吕擎峰等^[15]进行了温度改性水玻璃溶液的强度试验,分析了温度影响水玻璃粘性的机理。综合来看,改性水玻璃浆液配置主要采用的酸主要包括硫酸、磷酸、醋酸等几类,但考虑硫酸溶液对保存条件和操作要求较高,且具有腐蚀性强、易挥发的特点,会对施工人员造成危害,安全性较差。因此,本文选取更容易获得且危险性小的磷酸对水玻璃溶液进行改性,通过

室内试验探究其可行性与有效性。

本文以经改性水玻璃溶液加固细砂层所形成的固砂体为主要研究对象,通过对不同配合比的溶液凝结时间,以及渗透加固效果进行研究,系统分析溶液加固的有效性和可行性;结合无侧限抗压强度和剪切试验分析固砂体的力学特征,据此对其改性加固效果进行评价,并对其加固机理进行探究。

1 试验研究方法

1.1 试验原料

(1) 水玻璃:本试验采用水玻璃溶液,原料厂家来自武汉吉业升化工有限公司,分子式为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2$,呈灰白色, SiO_2 含量为 30%, Na_2O 含量为 10%,模数为 2,波美度 40°Be 。

(2) 磷酸:分子式为 H_3PO_4 ,属于中强酸,原料厂家来自武汉吉业升化工有限公司,试验所用磷酸为无色透明的稠状液体,密度为 1.685 g/ml ,相对浓度为 85%。

(3) 细砂:在工程现场取原状砂,开展室内颗粒分析试验,颗粒级配曲线具体见图 1。测试得到土样级配不良,不均匀系数 $C_u = 3.3$,曲率系数 $C_c = 1.2$ 。其中,粒径小于 1 mm 的砂样占主要部分,考虑大粒径砂粒在实际制样当中可能会造成拌和不均匀,易产生较大的试验误差,因此,本次试验主要对 1 mm 以下砂层进行制样和分析。

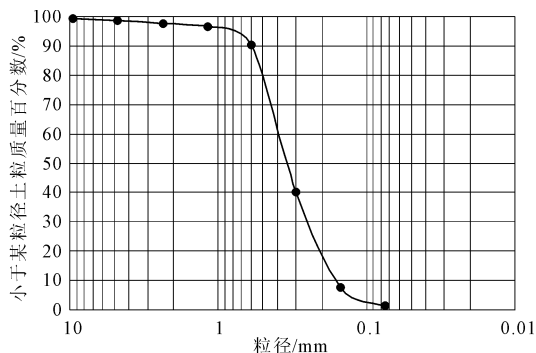


图 1 砂土颗粒级配曲线

对水玻璃溶液改性时,受限将蒸馏水量好后装入容器,缓慢倒入磷酸溶液并不断搅拌,充分稀释磷酸浓度且无气泡冒出,即 pH 值稳定后,缓慢加入水玻璃溶液,严格控制溶液滴入速度,防止局部浓度过大而出现结块,影响溶液渗透效果。进而配置得到不同体积比的改性水玻璃溶液。

1.2 试验设备

试验仪器为 YYW-2 型应变控制式无侧限压力

仪和 ZJ(ZQB-4) 型应变控制式直剪仪,试验参照国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)。

1.3 试验方案

为使得室内试验时试样的密实度趋近于工地现场的实际情况,且能取得砂样的最大干密度,采用先击实后静压的方法进行制样。同时为了方便取样,采用重型击实法,击实筒内径 $d=152\text{ mm}$,筒高 $h=116\text{ mm}$,击实筒容积为 $2\ 103.9\text{ cm}^3$,详细制样操作步骤如下:

① 将击实仪平稳置于刚性地面上,击实筒与底座联接之后安装好护筒,并用保鲜膜包裹击实筒壁。将称取的砂土样与水玻璃溶液拌合均匀,分三次倒入击实桶内,每层 5~6 击。

② 卸下护筒,用直刮刀修平击实筒顶部的试样,拆除底板,试样底部若超出筒外也应修平,擦净筒外壁。

③ 在试样上部施加 18 kPa 的垂直压力对试样进行凝结硬化固结。静压一定时间后,用推土器将试样从击实筒中推出。

④ 进行无侧限抗压强度试验时,将试样切削成高为 80 mm,直径为 39.1 mm 的圆柱体。在试样的两端涂抹一层凡士林,防止水分蒸发引起试样含水量的变化,随后将试样放在底座上,缓慢转动手轮,使得底座缓慢上升,当试样与加压板刚好接触时,立即停止转动,最后对量力环百分表和竖向量表进行手动调零。进行直接剪切试验时,将试样切削成高为 20 mm,直径为 68.1 mm 的环刀样。对准剪切容器上下盒,插入固定销,下盒按顺序放入透水石和滤纸,将带有试样的环刀刃口向上,对准剪切盒口,在试样上放滤纸和透水石,将试样小心地推入剪切盒内。

为了研究不同静压时间对改性水玻璃加固砂土效果的影响,设定步骤③中凝结硬化时间分别为 24 h、36 h、42 h、48 h,将相同质量的干砂土与相同体积的溶液均匀拌和,保证初始含水量相同。

本次研究的试验分为无侧限抗压强度试验和直接剪切试验。无侧限抗压强度试验过程中,竖向量表每走 0.2 mm,记一次测力计读数,当测力计读数出现峰值时,继续进行 3%~5% 应变后停止试验;当读数无峰值时,试验应进行到应变达到 20% 时停止试验。直剪试验的法向固结应力分别取 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa,固结时间为 4 h。试验时以小于 0.02 mm/min 的剪切速度进行剪切,当量力环百分表读数出现峰值时,继续剪切至位移等于 4 mm 时停止试验,并记录剪切破坏值;当量力环百分

表读数没有峰值时,剪切至剪切位移等于 6 mm 时停止试验。

2 试验结果与分析

2.1 溶液最优配合比

配制好的改性水玻璃溶液呈乳白色,随着时间推移,溶液水分逐渐蒸发,丧失流动性,最终凝结成块状固体^[16],具体形态演化过程如图 2 所示。

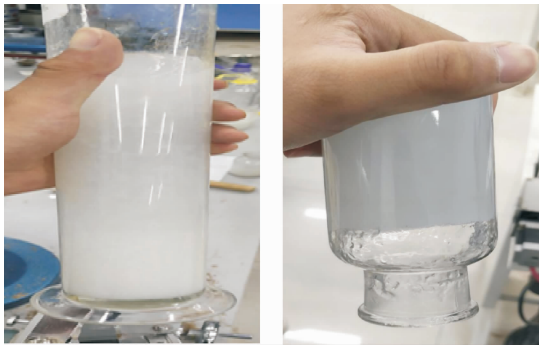


图 2 改性水玻璃溶液凝结状态实况图

为保证工期要求且满足溶液在砂土层中充分渗透的加固要求,室内开展不同水:磷酸:水玻璃体积比(下同)工况下改性水玻璃溶液凝结时间试验。本次室内试验采取单液配置方案,结合以往的浆液配置经验和注浆实践效果,需将水玻璃溶液稀释至 20°Be,磷酸稀释至 6%~10%,适宜浆液配比为磷酸:水玻璃=(1.3~2.0):1.0,换算得到的改性水玻璃浆液配比为(磷酸+水玻璃):水=1.0:(11.8~16.2)^[6-7]。本次以水:磷酸体积比=11:1 作为浆液配置起始比例。依据试验结果,绘制三种水:磷酸体积比(分别为 11:1、12:1、13:1)下浆液凝结时间随水玻璃掺量的变化曲线如图 3 所示。

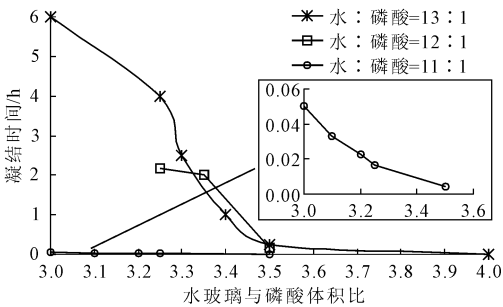


图 3 不同磷酸、水玻璃体积比的溶液凝结时间关系曲线图

由图 3 可知,在改性水玻璃溶液体积分数不变的条件,溶液的凝结时间与磷酸溶液的浓度、水玻璃的体积分数呈现负相关特征,即随着磷酸浓度或

改性水玻璃体积分数的增加,溶液的凝结时间会迅速减小。这是因为磷酸或水玻璃浓度的提高会导致化学反应加快,生成的硅酸胶体增多,溶液凝结时间变短。浆液凝结时间随配合比的改变呈现非线性变化特征,且在某个特定值附近发生突变^[17]。

结合暗挖隧道注浆工序特点及工程实践要求,需将溶液凝结时间控制在 2 h~3 h 内。结合图 3,汇总满足凝结时间要求的改性水玻璃溶液配比如表 1 所示。

编号	体积比			凝结时间
	蒸馏水	磷酸溶液	水玻璃溶液	
①	13.00	1.00	3.30	约 2 h 30 min
②	12.00	1.00	3.35	约 2 h
③	12.00	1.00	3.25	约 2 h 10 min

2.2 溶液渗透固结效果研究

为进一步分析改性水玻璃溶液在细砂层的渗透扩散过程,以 2.1 节中得到的 3 个特征溶液配比为主要研究对象,汇总溶液渗透扩散过程中固砂体的形态特征如图 4 所示;对比汇总相同溶液体积(100 ml),不同溶液配比下固砂体体积测试结果如表 2 所示。

据图 4 可以观察到,改性水玻璃溶液在无注浆压力加固砂层时,加固砂层表面的宽度范围不受改性水玻璃溶液的流动性控制,溶液主要通过砂颗粒间孔隙在垂直方向逐渐向下渗透的。当改性水玻璃溶液在砂土中凝结硬化后,所加固的砂土整体呈扁平状。把加固的砂整体放入水中,可以看见砂块的周围出现分层现象,这是由于砂颗粒无骨架作用且磨圆度较好,在有液体经过砂层时,砂颗粒会发生一定的位移,在移动过程中,溶质会逐渐附着在砂颗粒上,将砂颗粒逐步凝聚在一起,后续的溶液在渗透过程中由于渗流破坏作用,会对已经凝聚成块的砂颗粒产生渗透变形。还有一个重要原因是砂颗粒之间的孔隙通道大,在渗透过程中对改性水玻璃溶液的黏滞阻力较小,同时改性水玻璃溶液对砂层具有一定的冲刷作用,所以固砂体周围出现了分层现象。

编号	体积比			加固砂块体积 /cm ³
	蒸馏水	磷酸溶液	水玻璃溶液	
①	13	1	3.30	400
②	12	1	3.35	370
③	12	1	3.25	325



(a) 砂层初始状态(倒入改性水玻璃溶液100 ml)



(b) 固结砂块的形状



(c) 固结砂体积测量

图 4 溶液固结砂土试验结果图

由表 2 可知,同等体积条件下①号溶液能够固结的砂土体积最大,即每立方改性水玻璃溶液可固结 4 m³ 砂土。在实际工程当中,考虑施工进度和成本要求,可优先选择①号溶液。

2.3 砂土比例的确定

由于素砂颗粒之间只存在假黏聚力,只用砂粒难以制样,因此在本次室内试验测试过程中,采用砂和黄土进行混合制样(实际地层中,大多细砂层也均含有一定的土颗粒)。其中,砂和黄土均为彻底烘干状态。受溶液实际渗透效果和击实筒的容积限制,采用 4 200 g 砂土与 750 ml 的水玻璃溶液进行拌和;为合理确定砂土混合比例,结合无侧限抗压强度测试结果,进一步讨论室内制样过程中砂土混合比例对试验结果的影响。

在制样过程中,可以发现,当砂土比例小于 5:1 时,砂土呈现流体状态,在溶液凝结硬化过程中,流体部分易形成孔洞,水玻璃溶液凝结成块状,导致制样困难。因此,本次试验主要采用砂土质量比为 10:1 和 5:1 进行分别制样,汇总得到两种试样的轴向应力-应变曲线如图 5 所示。

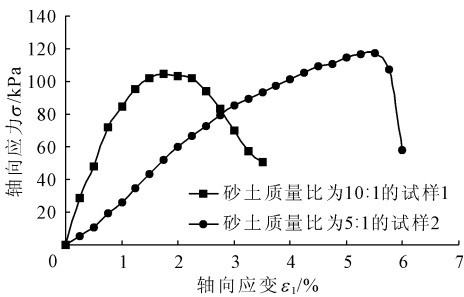


图 5 不同砂土质量比条件下试样
轴向应力-应变关系

对两种砂土比例试样的无侧限抗压强度试验结果进行分析,可以得到:

(1) 不同砂土质量比工况下,试样轴向应力应变关系呈应变软化特征,存在明显的峰值强度,其所能承受的最大峰值强度分别为 104.6 kPa、118.7 kPa。在转折点之前,随着轴向荷载的增大,试样轴向应变近似呈现弹性增长特征,具有一定的承载能力;当试样达到峰值强度后,固砂体结构逐渐发生破坏,应变持续发展所需的应力有所减小。

(2) 试样应力应变形态特征和砂土质量比存在一定的对应关系。与试样 1(砂土质量比 10:1)相比,试样 2(砂土质量比 5:1)的轴向应力-应变关系曲线在转折点之前相对平缓,其峰值强度稍有增加。

这一测试结果进一步说明:随着黄土掺量的增加,固砂体的弹性模量有所减小,峰值强度有所增加。这一力学特征,主要受到以下因素的影响:一方面由于随着黄土掺量的增加,细砂颗粒之间黄土填充更加充分,经改性水玻璃加固后所形成的固砂体

具有更高的密实程度,进一步使得固砂体承担外荷载的能力有所增加;另一方面,与细砂颗粒相比,黄土的可压缩性相对较强。砂土比例的减小,导致固砂体的弹性模量有所减小,即轴向应力-应变曲线斜率变缓。

综上所述,为满足制样简便、测试数据直观明显的试验要求,本次室内试验主要采用砂:土=5:1 的质量比进行制样,从无侧限抗压强度试验和直剪试验测试结果对改性水玻璃的固砂性能开展进一步讨论分析。

2.4 凝结硬化时间对无侧限抗压强度的影响

试验测试过程中,未经注浆加固的砂土试样均处于彻底烘干状态,采用 2.2 节中选定的①号溶液,得到不同凝结硬化时间下固砂体,为保证试验测试结果可靠性,每个凝结时间共完成两组平行试样进行测试。整理得到试样轴向应力-应变关系和凝结硬化时间的对应关系曲线如图 6 所示。

据图 6 可以观察到,不同凝结时间下,固砂体的应力-应变关系曲线均呈现应变软化特征。结合改性水玻璃固砂过程,具体说明如下:在改性水玻璃溶液固砂初期,溶液将砂土颗粒包裹;随着凝结时间的增加,溶液凝结硬化所形成的硅胶胶体将砂土颗粒有效粘结,有效提高了其力学性能。随着轴向荷载的增加,其轴向应力-应变关系曲线近似呈直线形态特征,即处于弹性阶段;当轴向压力超过其峰值强度后,砂土颗粒周边所形成硅胶胶体被破坏,砂粒-土体-硅胶胶体所形成的整体结构失稳,各组分之间发生相对滑动、调整,进入塑性变形阶段,最后破坏导致应力转移消散,曲线发生跌落。

统计各组平行试样中固砂体无侧限抗压强度范围值如表 3 所示。以较大值为统计对象,绘制改性水玻璃加固过程中无侧限抗压强度演化曲线如图 7 所示。

表 3 不同静压时间的试样无侧限抗压强度范围值				
静压时间/h	24	36	42	48
强度值/kPa	142 ~ 151	145 ~ 168	193 ~ 213	158 ~ 166

综合图 6、图 7,可以得到:经改性水玻璃加固后,固砂体的无侧限抗压强度可达到 140 kPa~213 kPa 范围。且随着凝结硬化时间的增加,固砂体的无侧限抗压强度测试值经历了先增长后减小的演变过程,整体呈现开口向下的曲线形态,存在极大值点,当凝结硬化时间约为 42 h 时,固砂体的无侧限抗压强度达到最大,为 213 kPa,之后随着改性水玻璃的挥发,固砂体强度逐步降低。

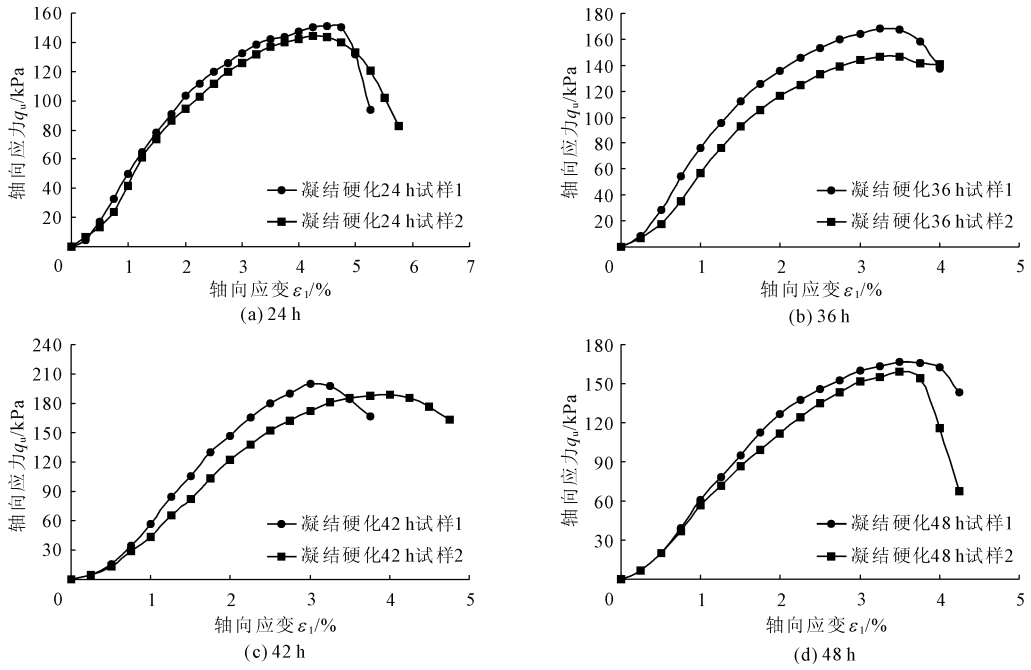


图 6 不同凝结时间的试样无侧限抗压试验关系曲线

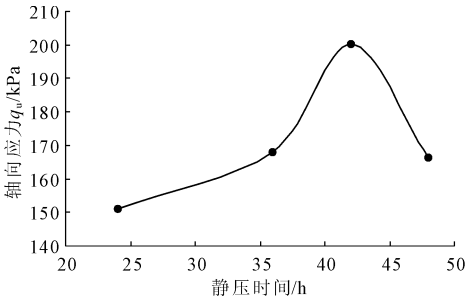


图 7 不同凝结时间的试样无侧限抗压试验较大值关系曲线

2.5 凝结硬化时间对抗剪强度的影响

在直接剪切试验中,通过匀速转动直剪仪的转轮对试样施加水平剪切力。绘制不同法向固结应力作用下,各组试样的剪切应力和剪切位移关系曲线如图 8 所示。

据图 8 可以得到:

(1) 不同凝结硬化时间下,经改性水玻璃加固的试样均存在明显的峰值抗剪强度,一旦剪切应力超过该特征强度,其剪切应力-应变曲线呈现出软化

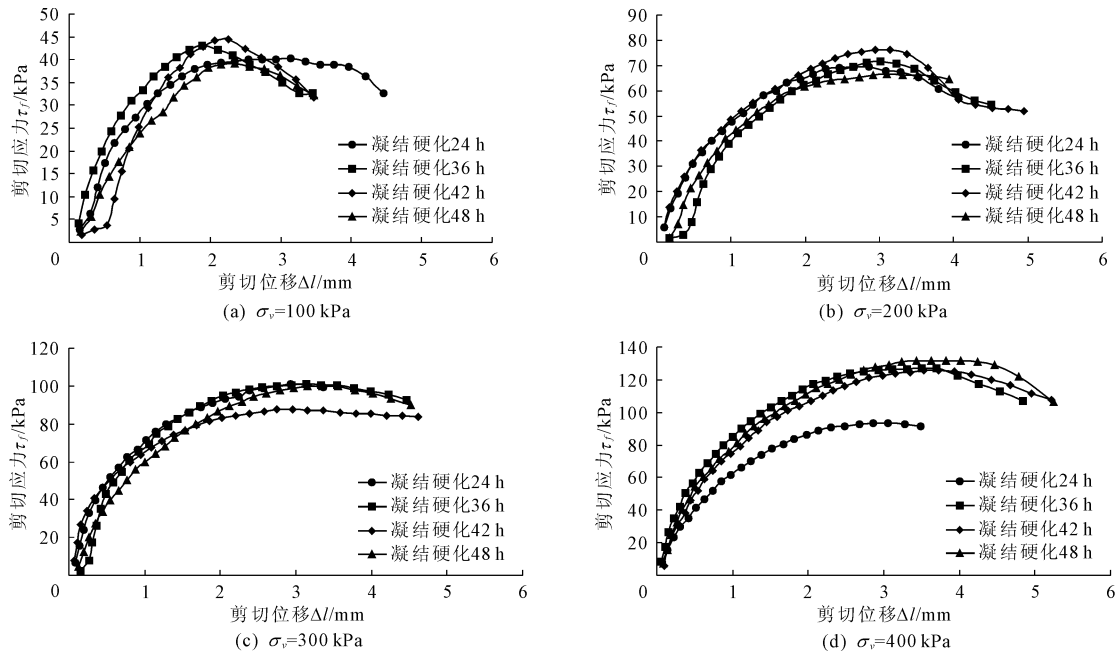


图 8 不同法向固结应力、不同静压时间的剪切应力-位移曲线

特征。该剪切力学特征和抗压强度特征向基本保持一致,即试样剪切过程同样与砂粒-土体-硅酸所形成的胶体结构的形成和破坏过程密切相关,具体详见前文相关内容。

(2) 改性水玻璃溶液对试样抗剪强度的提高受到法向固结应力的影响,当 $\sigma_v = 100\text{ kPa}$ 、 200 kPa 时,凝结硬化 42 h 的试样抗剪强度达到最大,而当 $\sigma_v = 300\text{ kPa}$ 、 400 kPa 时,凝结硬化 48 h 的试样抗剪强度达到最大。随着法向固结应力的增大,其抗剪强度峰值呈现逐步增长趋势。

以抗剪强度 τ_f 为纵坐标,垂直压力 σ_v 为横坐标,绘制得到不同凝结硬化时间下固砂体的砂土抗剪强度包线如图 9 所示。利用式(1) 进行线性拟合,得到其抗剪强度指标 c 、 φ 值,具体如表 4 所示。

$$\tau_f = c + \sigma_v \tan \varphi \tag{1}$$

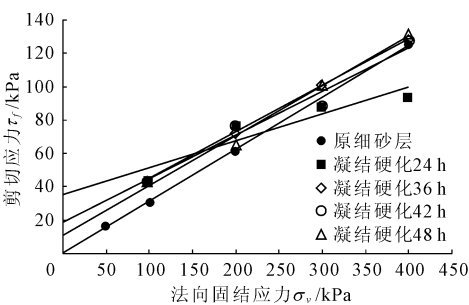


图 9 不同静压时间的砂土抗剪强度包线

表 4 不同静压时间的试样抗剪强度参数

静压时间/h	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
原砂层	0.37	16.81
24	28.33	10.81
36	15.15	15.75
42	19.84	14.29
48	6.37	17.32

结合图 9 和表 4,可以得到如下结论:

(1) 经改性水玻璃浆液加固后,固砂体的黏聚力 c 由 0.37 kPa 增长至 $6.37\text{ kPa} \sim 28.33\text{ kPa}$,其主要原因在于改性水玻璃浆液在细砂层内部扩散过程中,填充了砂粒之间的孔隙,同时生成的硅酸胶体将呈不规则形状的砂粒凝结成整体,有效改善了其粘结特性。

(2) 改性水玻璃加固细砂过程中,固砂体的内摩擦角 φ 由 16.81° 变化为 $10.8^\circ \sim 17.32^\circ$,其测试值有所降低。以静压时间 24 h 的试样为例,其内摩擦角仅为 10.81° ;与经加固的原细砂层相比,摩擦角数值存在 6° 左右的降低。这一指标变化过程的主

要原因是改性水玻璃浆液在砂土颗粒间形成的胶凝体,在一定程度上增强了砂土颗粒间的可移动性,具体表现为内摩擦角的减小。

(3) 随着浆液凝结时间的增加,固砂体的抗剪强度包线及强度参数可发生显著变化。当凝结时间为 24 h 时,改性水玻璃加固一方面提高了砂层的黏聚力,另一方面引起内摩擦角降低,其抗剪强度包线和原砂层存在交叉点。在较小应力段 ($0\text{ kPa} \sim 200\text{ kPa}$),受黏聚力增加的影响,固砂体的抗剪强度得到有效提高;在较大应力段 ($200\text{ kPa} \sim 400\text{ kPa}$),主要受到内摩擦角降低的影响,固砂体的抗剪强度包线略低于原砂层。

随着溶液凝结固化时间的增加,固砂体的抗剪强度包线逐步抬升,均高于原砂层,即改性水玻璃浆液有效改善了其抗剪强度。

利用表 4 所述数据,绘制得到固砂体黏聚力、摩擦角与凝结时间的关系曲线如图 10 所示。

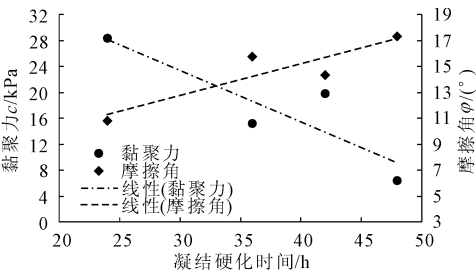


图 10 内摩擦角和黏聚力随凝结硬化时间变化的拟合曲线

由图 10 可知,随着浆液凝结时间的延长,固砂体的内摩擦角指标近似呈现线性增长趋势,而黏聚力指标有所减小。

综上所述,在改性水玻璃浆液入渗扩散初期,其抗剪强度的增长主要依赖溶液中的粘结作用,在细砂粒周边形成硅酸胶体,使得其黏聚力大幅度增长;另一方面,因凝结时间相对较短,硅酸胶体和细砂颗粒之间尚未形成连接牢固,这一因素在一定程度上增强了砂颗粒间的可移动性,具体表现为加固体内摩擦角指标的降低。在较大应力条件,加固体仍存在一定的剪切破坏风险。若盲目开挖,存在一定的砂层塌落风险。

随着凝结时间的增长,硅酸胶体和细砂颗粒之间形成相对牢固的连结体系,其内摩擦角指标有所增加,但其数值始终处于较小数值范围内;随着改性水玻璃浆液和细砂颗粒间所形成胶体颗粒的粘度减小,其黏聚力指标呈现快速减小的趋势。其抗剪强

度依靠内摩擦角和黏聚力共同提供,当两种作用达到平衡时抗剪强度达到最大。

3 结 论

利用磷酸溶液对水玻璃进行改性,在合理确定溶液配合比和砂土质量比的基础上,利用无侧限压力仪和直剪仪对固砂体的应力应变关系及抗剪强度特征开展了试验测试,初步分析了改性水玻璃溶液对细砂的加固效果和机理,得到以下结论:

(1) 通过室内试验确定了溶液凝结时间满足工序要求的改性水玻璃溶液配合比共有 3 种,其中最优配合比为水:磷酸:水玻璃 = 13:1:3.3, 1 m^3 溶液可固结细砂约 4 m^3 。

(2) 溶液对砂样的加固效果受到凝结硬化时间的影响,轴向抗压强度及抗剪强度均随时间呈现先增大后减小的趋势。

(3) 经改性水玻璃加固后,固砂体的无侧限抗压强度处于 140 kPa~213 kPa 范围内。当凝结时间约为 42 h 时,抗压强度达到最大。

(4) 改性水玻璃浆液入渗扩散初期,固砂体黏聚力提高,摩擦角降低,与原砂层相比,其抗剪强度包线存在交叉点。随着凝结时间的增加,黏聚力逐渐减小而内摩擦角有所增加,当两种作用达到平衡时,抗剪强度最大。

工程实践过程中,应关注改性水玻璃固砂体的强度衰减特征,选择合理的浆液配比参数和工程开挖时机,避免固砂体强度未有效增长时,盲目开挖引发砂层塌落风险。

参考文献:

- [1] 舒志乐,刘保县,赵宝云,等. 土力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2015.
- [2] Karol R H. Chemical grouting and soil stabilization[M]. Crc Press, 2003.
- [3] Funehag J, Fransson Å. Sealing narrow fractures with a Newtonian fluid: model prediction for grouting verified by field study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006,21(5):492-498.
- [4] 韩忠存. 北京地铁粉细砂层改性水玻璃注浆加固的研究和应用[J]. 隧道建设,1990(1):1-13.
- [5] 周云定,程 坤. 低含水率粉细砂地层隧道化学注浆超前支护技术研究[J]. 工程建设与设计,2020(5):120-121,145.
- [6] 肖尊群,刘宝琛,乔世范,等. 新型酸性水玻璃-碳酸钙注浆材料试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):2829-2834,2839.
- [7] 贺 文,周兴旺,徐 润. 新型水玻璃化学注浆材料的试验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(11):1812-1815.
- [8] 李 夏,徐军哲,刘人太,等. 新型酸性水玻璃注浆材料的研究与应用[J]. 隧道建设,2017,37(10):1296-1302.
- [9] 卓 越,李治国,高广义. 隧道注浆技术的发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11):1953-1963.
- [10] Croce P, Modoni G. Design of jet-grouting cut-offs[J]. Ground Improvement, 2007,11(1):11-19.
- [11] Coulté S, Martin C D. Single fluid jet-grouting strength and deformation properties[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006,21(6):690-695.
- [12] 蒋硕忠. 我国化学灌浆技术发展及展望[J]. 长江科学院院报,2003,10(5):26-28.
- [13] 曹留金,李昕炜. 改性水玻璃溶液的试验及应用研究[J]. 石家庄铁道学院学报,2001(2):92-94.
- [14] 张连震,李志鹏,张庆松,等. 砂层压密加固效应室内试验研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(3):89-94.
- [15] 吕擎峰,吴朱敏,王生新,等. 温度改性水玻璃固化黄土机制研究[J]. 岩土力学,2013,34(5):1293-1298.
- [16] 甄泽强,王 梅. 酸性水玻璃凝胶时间的影响研究[J]. 煤炭技术,2018,37(10):360-362.
- [17] 关振伟. 粉细砂地层注浆施工酸性水玻璃胶凝时间研究[J]. 中国水能及电气化,2019(11):13-16.