

DOI: 10.11779/CJGE202209019

土工织物应用于新型压密注浆土钉的试验研究

张升¹, 彭锐², 叶新宇^{*1}, 李煜¹, 刘蔚¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 2. 武汉地铁运营有限公司, 湖北武汉 430030)

摘要: 针对乳胶膜式压密注浆土钉的潜在缺陷, 提出了采用土工织物替代乳胶膜改进该土钉的新思路。首先, 基于自研的土工织物反滤性能测定装置, 开展了一系列水泥浆液反滤试验, 研究了水灰比、浆液体积和注浆压力对土工织物反滤性能的影响, 得到了注浆过程中上述影响因素影响下反滤时间和水灰比的变化规律。其次, 对反滤前/后的砂土进行了贯入试验, 评估了由于浆液中黏性物质入渗引起的周围土体强度提高。再次, 对反滤前/后的水泥试块进行了单轴压缩试验, 探明了节泡(水泥试块)强度显著提高的原因是土工织物反滤过程中节泡内水灰比的降低。最后, 开展了土工织物和乳胶膜式压密注浆土钉的两组对比拉拔试验, 验证了土工织物改进压密注浆土钉的优越性。研究成果能为压密注浆土钉的优化和应用奠定基础。

关键词: 压密注浆土钉; 土工织物; 水灰比; 浆液体积; 注浆压力

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)09-1733-08

作者简介: 张升(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: zhang-sheng@csu.edu.cn。

Experimental evaluation of performance of compaction-grouted soil nails using geotextile

ZHANG Sheng¹, PENG Rui², YE Xin-yu¹, LI Yu¹, LIU Wei¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Wuhan Metro Operation Co., Ltd., Wuhan 430030, China)

Abstract: A new idea that adopts a geotextile instead of a latex membrane to improve the performance of a pressure-grouted soil nail is proposed. First, based on the self-developed device for testing filtration performance of the geotextile, a series of cement slurry filtration tests are carried out to study the influences of the water-cement ratio, slurry volume and grouting pressure on its filtration performance. The variations in the filtration time and water-cement ratio under the changes in the aforementioned influencing factors during pressure grouting are obtained. Second, a series of penetration tests on the surrounding sands before and after filtration tests are conducted, and the strength improvement due to the infiltration of cohesive substances from grout slurry is subsequently evaluated. Third, the uniaxial compression tests are carried out on the cement blocks before and after the filtration tests, and it is found that the strength of the grout bulb (cement block) largely increases because the water-cement ratio in the grout bulb is significantly reduced during the filtration of the geotextile. Finally, two series of pull-out tests on the compaction-grouted soil nails with a geotextile and a latex membrane are carried out to verify the superiority of improving the compaction-grouted soil nails by the geotextile. This study is helpful for the optimization and application of the compaction-grouted soil nails by using the geotextile.

Key words: compaction-grouted soil nail; geotextile; water-cement ratio; slurry volume; grouting pressure

0 引言

压密注浆土钉^[1-2]是一种由杆体和节泡组成的新型土钉, 其工作机理如图1所示。施工过程中, 采用土工织物包裹注浆孔, 通过控制注浆压力和浆液体积, 使其形成形状规则的节泡。根据研究^[3], 新型土钉的抗拔力由3个部分组成: 节泡表面的摩擦力 f_1 、土钉表面的摩擦力 f_2 和被挤压土体的反作用力 σ_x (见图1), 其中, σ_x 起主导作用^[3-4]。由此, 节泡的尺寸、强度等因素对抗拔力影响显著。

目前, 节泡是由乳胶膜经过注浆形成的球体。由于乳胶膜透气性差, 导致注浆后管内的气体仍滞留于节泡中, 形成节泡空洞, 使节泡强度降低。其次, 乳胶膜易在注浆时被撑破, 形成不了节泡。最后, 在密

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008401); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40770); 湖湘高层次人才聚集工程创新团队项目(2019RS1008); 中南大学研究生自主探索创新项目(2021zzts0761, 2021zzts0222)

收稿日期: 2021-09-22

*通信作者(E-mail: yexinyu113@csu.edu.cn)

实度较大的土体中，很难通过注浆使乳胶膜膨胀形成节泡，导致压密注浆土钉的抗拔性能得不到充分发挥和有效预测。针对这些问题，笔者提出采用土工织物替代乳胶膜应用于压密注浆土钉。首先，土工织物具有良好的透气性和反滤性能，可以防止节泡空洞和减小节泡内浆液的水灰比，增大节泡的强度。其次，土工织物强度较高，不易被浆液撑破。再者，水泥浆液中的黏性物质能够透过土工织物进入周围土体中，进而提高该新型土钉的性能。最后，土工织物膨胀有限，从而节泡体积可控，抗拔力可预测。因此，采用土工织物替代乳胶膜能使新型压密注浆土钉具有更好的应用价值。

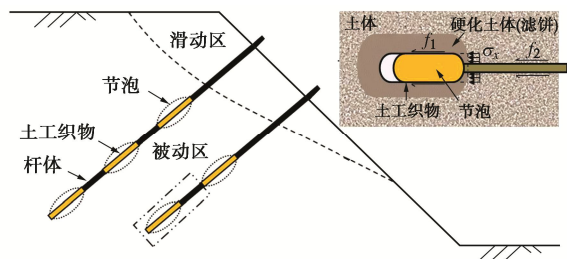


图 1 压密注浆土钉作用机理

Fig. 1 Function mechanism of compaction-grouted soil nails

目前，土工织物在实际工程中应用广泛^[5-6]。在海洋领域，土工织物用于防止填料的侵蚀和坍塌^[7-8]。地基工程中，土工织物可以加固土体进而提高承载力^[9]。环境治理中，土工织物能对泥浆废物和受污染的沉积物进行脱水，从而使其易于处理^[10]。杨春和等^[11]进行了尾矿-土工布渗透试验及微观观测，结果表明，细粒尾矿更容易产生物理淤堵，且化学淤堵程度与浆液中离子的种类和浓度有关。乐超等^[12]进行了梯度比试验，探讨了反滤效果与织物特性和水力梯度的关系。唐琳等^[13]测试了不等轴双向拉伸应变下土工织物的孔径参数变化，分析了孔径变化对反滤性能的影响。余巍等^[14]提出了一种概率保土准则用于描述土工织物反滤过程。吴纲等^[15]进行了土工织物覆砂和黏土的渗透试验，探讨了土工织物与土共同作用下的渗透机理。汪帅等^[16]进行了不同拉伸率下土工织物-土反滤系统的渗透试验，总结了双向拉伸和水流条件对反滤系统性能的影响。

综上所述，目前针对土工织物的研究主要集中在环境工程应用以及不同上覆土体下系统的反滤效果。虽然文献中的研究成果对相应的实际工程具有较好的借鉴意义，但本研究的目标为水泥浆液的反滤及其对周围土体的影响，超出了上述文献研究范围。因此，土工织物与压密注浆土钉的结合是一个值得研究的新课题。

本文首先开展了水泥浆液反滤试验和相关强度试验研究，得到了水灰比、浆液体积和注浆压力影响下土工织物的反滤性能以及反滤前/后周围土体强度变化规律。随后，通过两组对比拉拔试验，直接验证了土工织物改进压密注浆土钉的优越性。本文的研究不仅能为土工织物改进压密注浆土钉的应用奠定基础，也能为类似的注浆工程的应用提供参考依据。

1 材料、设备和方案

1.1 试验材料

试验采用 P•O42.5 水泥，其相关参数见表 1。土工织物为长丝纺黏针刺非织造土工布，其相关参数见表 2。砂为粉砂（SP），其相关参数见表 3，级配曲线如图 2 所示。

表 1 水泥的相关参数

Table 1 Related parameters of cement

相关参数	细度 (45 μm) /%	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)	烧失量 /%	初凝 /min	终凝 /min
数值	10.8	33.5	3.54	178	228

表 2 土工织物的相关参数

Table 2 Related parameters of geotextile

相关参数	克重 /(g·m ⁻²)	厚度 /mm	断裂强力 /(kN·m ⁻¹)	等效孔径 /mm	幅宽偏差 /%
数值	300	2.2	15	0.07~0.2	-0.5

表 3 砂的物理性质参数

Table 3 Related parameters of sand

相关参数	相对质量密度	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最小干密度 /(g·cm ⁻³)
数值	2.67	1.70	1.42

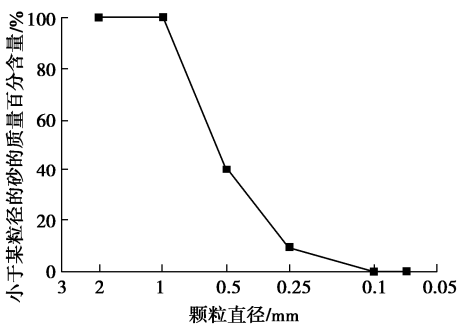


图 2 砂的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of sand

1.2 试验设备

自主设计研发的土工织物性能测定装置^[17-18]包括灌浆装置、支撑装置和反滤收集装置，如图 3 所示。试验前，将土工织物在水中浸泡 12 h，使其饱和，用凡士林均匀涂抹上罐室的内壁，将一定量的砂填入下罐室。首先，将饱和的土工织物用橡胶圈固定在法兰盘上，防止浆液从侧边渗漏。其次，向上罐室中灌入浆液并迅速关闭阀门。然后，打开加压孔的阀门，对

上罐室进行加压, 监测滤出浆液质量随时间的变化。最后, 待电子秤读数稳定后, 对反滤后的浆液进行取样并在 20℃ 的环境下养护 7 d 后, 进行单轴压缩试验。

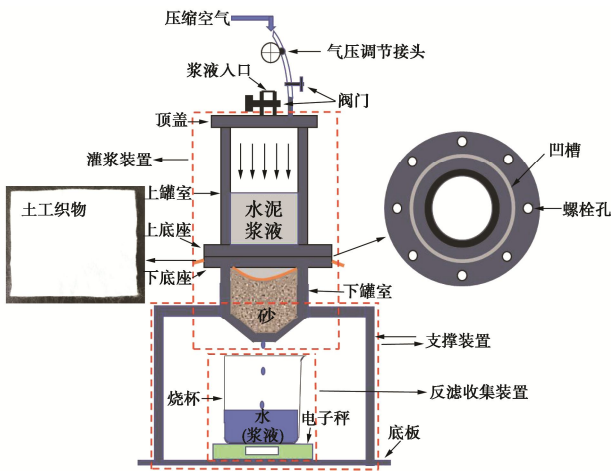


图 3 土工织物反滤性能测定试验装置

Fig. 3 Test device for filtration performance of geotextile

对反滤前/后的砂土进行了小型贯入试验, 并通过贯入阻力评估因黏性物质入渗引起的强度变化。贯入试验装置 (见图 4) 由位移计、力传感器、探杆、支撑架和升降板组成。

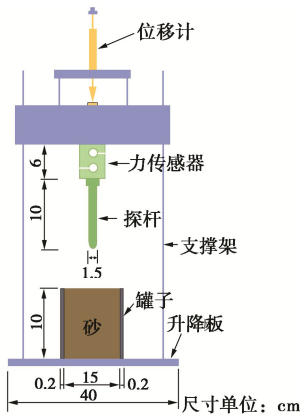


图 4 贯入试验装置

Fig. 4 Test device for penetration

1.3 试验方案

由压密注浆土钉的作用机理可知, 节泡的大小和强度以及周围土体的强度是影响其性能发挥的主要因素^[19]。水灰比的变化会影响所形成节泡的强度; 浆液体积随时间的变化会影响节泡中的水灰比, 进而影响节泡强度; 注浆压力直接影响该土钉的抗拔力。因此, 本文改变上述 3 个参数, 进行了 14 组试验 (见表 4), 研究土工织物的反滤性能。此外, 对有无反滤的砂土进行小型贯入试验 (见表 5), 以评估采用土工织物后砂土强度的变化 (无反滤即对应采用乳胶膜的压密注浆土钉)。

表 4 反滤试验方案

Table 4 Test schemes for filtration

影响因素	水灰比	浆液体积/(10 ⁻³ ·m ³)	注浆压力/kPa	初始干密度/(g·cm ⁻³)	初始含水率/%
水灰比	0.4	4	200	1.460	0
	0.5				
	0.6				
	0.7				
浆液体积/(10 ⁻³ ·m ³)	0.5	2	200	1.460	0
		3			
		4			
		5			
注浆压力/kPa	0.5	4	100	1.460	0
			200		
			300		
			400		
			500		

表 5 小型贯入试验方案

Table 5 Test schemes for small-scale penetration

影响因素	水灰比	浆液体积/(10 ⁻³ ·m ³)	注浆压力/kPa	初始干密度/(g·cm ⁻³)	初始含水率/%
砂样经过反滤 (土工织物)	0.4	4	200	1.460	0
	0.5				
	0.6				
	0.7				
	0.5	4	100	1.460	0
			200		
砂样未经反滤 (乳胶膜)	—	—	300	1.505	4
			400		
			500		
			—	1.529	
			—	1.548	
			—	1.561	

另外, 对反滤前/后的浆液进行了单轴压缩试验和物相分析, 探讨了反滤对浆液组成的影响。最后, 开展了乳胶膜式土钉和土工织物式土钉的对比拉拔试验, 直接验证了土工织物改进压密注浆土钉的优越性。

2 试验结果分析

2.1 水灰比的影响

图 5 展示了在不同初始水灰比下, 反滤过程中水灰比随时间的变化。浆液的水灰比随时间的增加迅速下降, 然后逐渐趋于稳定。因为随着试验的进行, 浆

液中的水越来越少,导致水灰比显著下降直至反滤结束。实际上,在所有试验中,滤液的主要成分是水,所含的水泥浆液中的黏性物质(或水泥颗粒)不到10 g。值得注意的是,虽然初始水灰比不同,但它们的最终水灰比都达到相似的值(即0.31)。这表明初始水灰比对土工织物中残余浆液的影响不大。反滤结束时间(最早达到最小水灰比的时间)随初始水灰比的增加逐渐增加,但增加速率逐渐降低。可以预见的是,水灰比继续增加,反滤结束时间不会有大幅的增加。值得注意的是,工程中初始水灰比越大,注浆效率往往越高,压力损失越小。即初始水灰比和反滤结束时间相互制约。因此,选择合适的初始水灰比,保证注浆效率的同时,也应避免注浆时间过长。

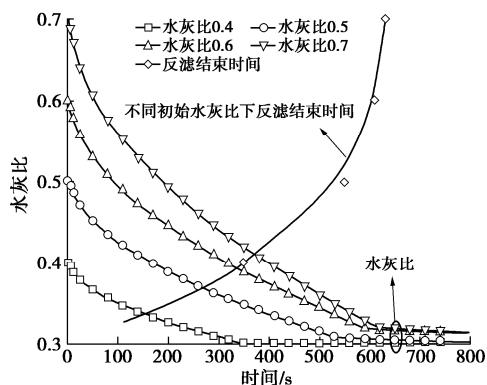


图5 不同初始水灰比下水灰比随时间的变化

Fig. 5 Variation of water-cement ratio with time under different initial water-cement ratios

反滤试验后,土工织物外部砂土的干密度变为 1.529 g/cm^3 ,含水率变为4%(最大持水量)。同时,还生成了滤饼(见图6(a))。由于大部分浆液颗粒经过反滤仍滞留在土工织物上方(节泡中),可认为只有黏性物质透过土工织物进入周围砂土中(试验前的土样见图6(b)),所以采用土工织物所形成的滤饼不同于未采用土工织物所形成的滤饼(见图6(c))。

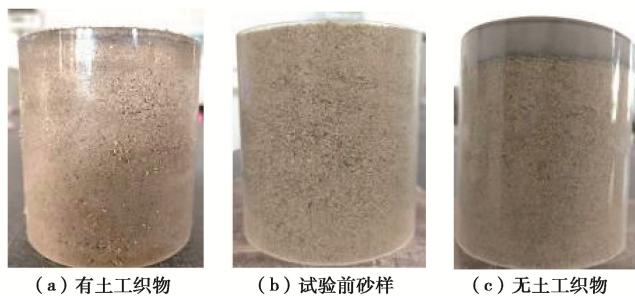


图6 有/无土工织物的滤饼

Fig. 6 Filter cakes with and without geotextile

为了验证浆液中黏性物质入渗使土样强度的提高,通过小型贯入试验装置对有/无反滤的砂土进行了

贯入试验(见图7)。由图可知,有反滤的砂土强度(即贯入阻力)明显高于没有反滤的砂土(无反滤即对应采用乳胶膜的压密注浆土钉),这表明黏性物质的入渗可以大大提高周围砂土的强度。此外,经过反滤试验的砂土在贯入过程中表现出软化的特点,这是由于靠近土工织物的部分土体强度增强显著,形成类似“硬壳层”(滤饼)现象。初始水灰比越高,峰值贯入应力越小,残余贯入应力越大。这是因为水灰比越高,反滤过程中进入砂土中黏性物质的浓度越低,导致土工织物附近滤饼的峰值贯入应力越小。但是,由于含水率更高,能使更多的黏性物质随滤液进入更深的砂土中,从而导致残余贯入应力更大。

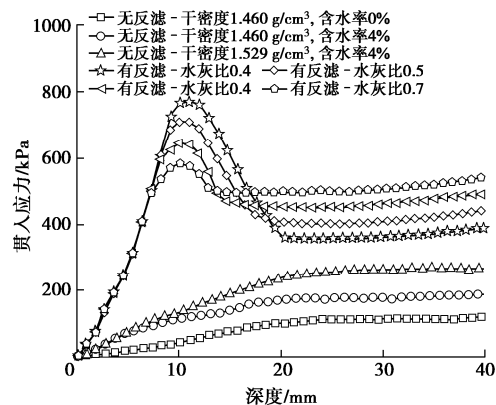


图7 不同水灰比下贯入应力随深度的变化

Fig. 7 Variation of penetration stress with depth under different water-cement ratios

图8总结了贯入应力随水灰比的变化规律。通过对试验结果分析,反滤后砂土强度的提高可分为3个原因:含水率的提高、注浆压力使砂土致密化以及黏性物质的胶结。通过进一步试验发现:含水率由0%变为4%,贯入应力增加了61 kPa;注浆压力使砂土的干密度由 1.460 g/cm^3 增加到 1.529 g/cm^3 ,贯入应力增加了86 kPa。因此,排除上述因素的影响,由不同水灰比条件下,黏性物质的入渗使峰值贯入应力分别增加了515.52, 452.02, 387.40和325.00 kPa,残余贯入应力分别增加了100.12, 145.01, 195.03和242.05 kPa。综上,含水率和干密度的变化对周围砂土强度提高的影响明显小于黏性物质的入渗,进一步证明了采用土工织物改进压密注浆土钉的优势。

2.2 浆液体积的影响

图9展示了在不同浆液体积下,水灰比随时间的变化。浆液体积越大,水灰比下降速度越慢。因为浆液体积越大含水量就越多,而反滤效率基本相同,所以水灰比下降越慢。此外,最终水灰比基本趋于一致,与浆液体积无关。这表明浆液体积对土工织物中残余浆液的影响不大。由于在一定水灰比和注浆压力下,浆液体积与反滤结束时间呈线性关系,所以,现场实

施注浆的结束时间可准确预测,对实际工程应用具有指导作用。

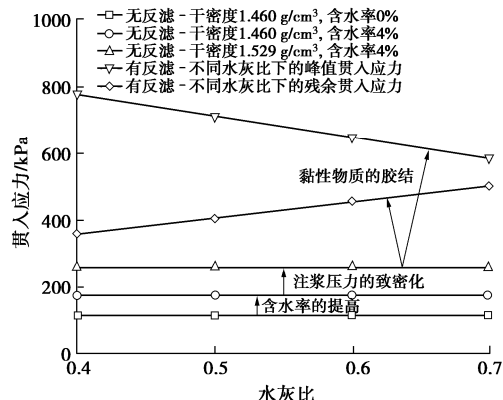


图8 贯入应力随水灰比的变化

Fig. 8 Variation of penetration stress with water-cement ratio

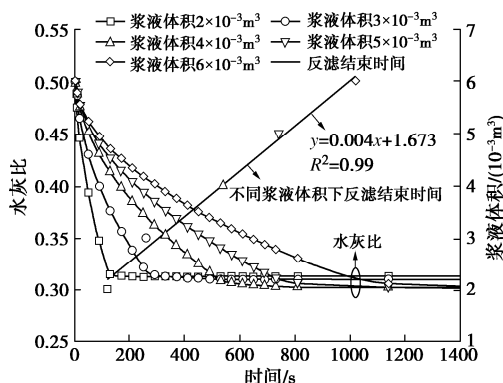


图9 不同浆液体积下水灰比随时间的变化

Fig. 9 Variation of water-cement ratio with time under different slurry volumes

类似的,砂土的干密度和含水率分别增加至 1.529 g/cm^3 和 4%。对有/无反滤的砂土进行贯入试验(无反滤即对应采用乳胶膜的压密注浆土钉),其结果如图10所示。随浆液体积的增加,峰值贯入应力略有增大,而残余贯入应力基本不变。这是因为水灰比和注浆压力一定时,浆液体积增加,导致更多的水渗透,使浅层砂土中(滤饼)积聚更多的黏性物质,而深层砂土中的胶结程度基本相同。

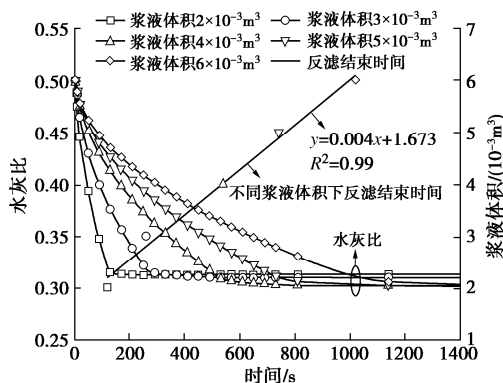


图10 不同浆液体积下贯入应力随深度的变化

Fig. 10 Variation of penetration stress with depth under different slurry volumes

图11总结了贯入应力随浆液体积的变化规律。随浆液体积的增加,峰值贯入应力略有增大,而残余贯入应力基本不变。反滤试验后,土样的含水率由0%变为4%,贯入应力增加了61 kPa,并且由于砂土的致密化,贯入应力进一步增加了86 kPa。由于不同浆液体积下黏性物质的入渗,峰值贯入应力分别增加了392.31, 422.22, 452.02, 485.13和513.01 kPa,残余贯入应力分别增加了143.42, 144.13, 145.01, 144.11和145.03 kPa。因此,浆液体积的变化对周围砂土强度的影响相对较小。

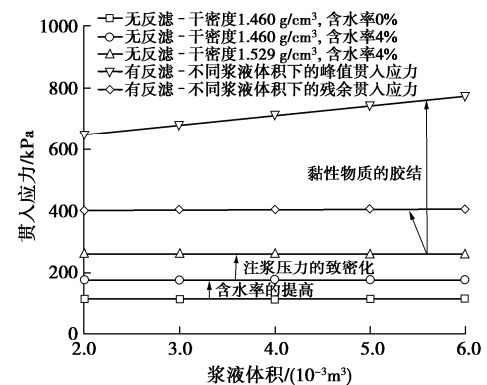


图11 贯入应力随浆液体积的变化

Fig. 11 Variation of penetration stress with slurry volume

2.3 注浆压力的影响

图12为不同注浆压力下,水灰比随时间的变化。注浆压力越大,水灰比下降越快,反滤结束时间越小。这是因为注浆压力越大,浆液中的水更容易被压力挤出,同时土工织物被拉伸更大^[20](孔径更大),导致水(浆液)更容易滤出。此外,注浆压力较小时(100~200 kPa),反滤结束时间差异较大,当注浆压力继续增大时,该差异迅速减小至较低水平。这表明在低压范围内,注浆压力对土工织物的反滤性能影响较大,这一影响随注浆压力的增大而迅速减小。这是因为试验前期浆液中的水更容易被滤出,此后,注浆压力增加对提高滤水效率的作用逐渐减小。

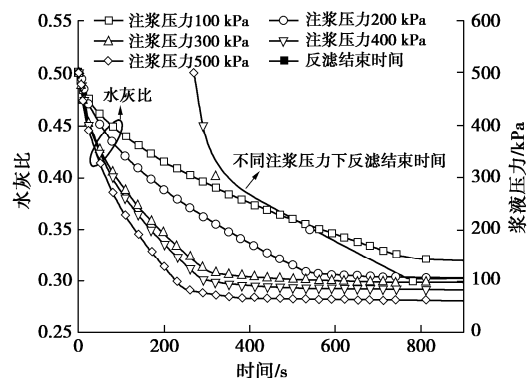


图12 不同注浆压力下水灰比随时间的变化

Fig. 12 Variation of water-cement ratio with time under different grouting pressures

不同注浆压力下,反滤试验后的砂土干密度分别变为 1.505, 1.529, 1.548, 1.561 和 1.570 g/cm^3 , 含水率变为 4%。不同干密度下有无反滤砂土的贯入试验结果如图 13 所示(无反滤即对应采用乳胶膜的压密注浆土钉)。峰值贯入应力和残余贯入应力都随注浆压力的增大而逐渐增大,且均高于无反滤(无黏性物质渗入)的峰值贯入应力和残余贯入应力。这是因为注浆压力越大,从浆液中挤出的黏性物质越多,进而渗透到相对较深的砂土层中使其胶结,因此,贯入应力(包括峰值和残余)更大。

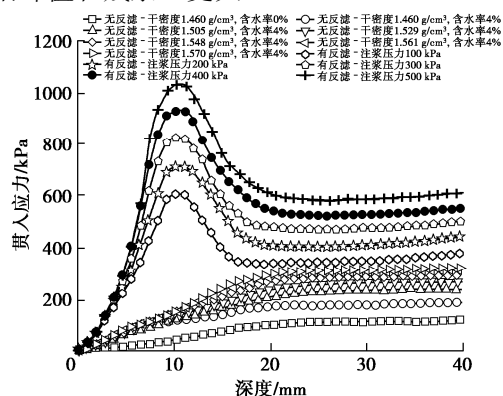


图 13 不同注浆压力下贯入应力随深度的变化

Fig. 13 Variation of penetration stress with depth under different grouting pressures

图 14 展示了贯入应力随注浆压力的变化规律。峰值贯入应力和残余贯入应力都随注浆压力的增大而逐渐增大,且均高于无反滤(无黏性物质渗入)的峰值贯入应力和残余贯入应力。当含水率由 0%变为 4%,贯入应力增加了 61 kPa。并且,随着注浆压力从 100 kPa 增加到 500 kPa,土样的干密度增加量有所差异,相应的贯入应力分别增加了 56, 86, 110, 126 和 137 kPa,而由于黏性物质的入渗,峰值贯入应力分别增加了 375.82, 452.02, 536.46, 628.66 和 720.63 kPa,残余贯入应力分别增加了 113.21, 145.01, 186.08, 225.11 和 272.02 kPa。因此,当注浆压力变化时,由于黏性物质入渗不同引起的砂土强度变化差异明显大于干密度变化引起的强度差异。

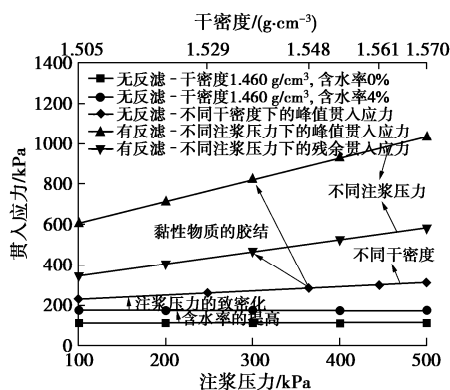


图 14 贯入应力随注浆压力的变化

Fig. 14 Variation of penetration stress with grouting pressure

3 强度试验

上述试验中,由于反滤作用,节泡内浆液的水灰比变化,从而节泡的强度随之发生变化。因此,对有无反滤的水泥试块进行了单轴压缩试验。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[21]制备不同水灰比的水泥试块,进行单轴压缩试验,得到不同水灰比下水泥试块的强度(7 d)。由此,确定该水泥的最佳水灰比为 0.31(相应的强度为 60.42 MPa)。同样,对反滤后的浆液取样并制样养护,进行单轴压缩试验。图 15 展示了有/无反滤的水泥试块强度(无反滤即对应采用乳胶膜的压密注浆土钉)。通过对比发现,反滤后试块强度(节泡强度)都得到了明显提高,且初始水灰比越大,强度提高幅度越大,这表明采用土工织物对提高节泡强度作用显著。同时,根据 Li 等^[22]的研究可知,提高浆液的强度也可以提升节泡和土钉杆之间的黏结强度,从而对压密注浆土钉的抗拔性能起到促进作用。

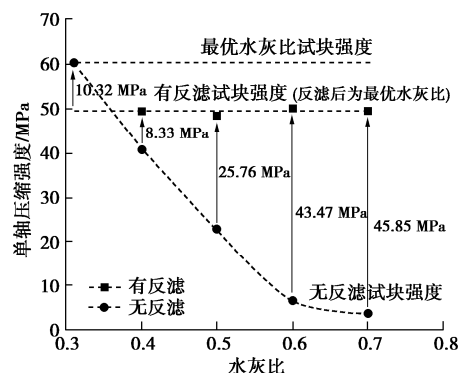


图 15 有/无反滤水泥试块强度

Fig. 15 Strengths of cement blocks with and without filtration

从图 5 中可以看出,所有砂样反滤后的最终水灰比均稳定在 0.31 左右,接近最优水灰比。这表明使用土工织物替代乳胶膜可以有效降低节泡内的水灰比。尽管反滤后,最终水灰比稳定在 0.31 左右,但是与无反滤最优水灰比时的试块相比,其强度降低了约 10.32 MPa。这是因为反滤过程中,维持试块强度的黏性物质(如硅酸三钙)可以透过土工织物的孔隙,随滤液渗入周围土体中,从而降低了水泥试块的强度。通过 X 射线衍射仪,在水灰比为 0.5 时对有/无反滤的浆液进行了物相分析。结果表明,无反滤浆液中的硅酸三钙含量远高于经过反滤后的浆液,并且 Lei 等^[23]的研究表明硅酸三钙是影响水泥早期强度的主要物质。因此,浆液反滤造成的黏性物质渗入土体使得节泡强度的提高(由于水灰比的降低)效率小于 100%。

最后,在室内进行了对比拉拔模型试验(见图 16),模型箱的长、宽、高分别为 80, 80 和 70 cm,其中节泡的中心距模型箱上、下和前边界分别为 35,

35 和 40 cm。土钉杆体为圆柱形空心钢管, 外径为 4 cm, 内径为 3.8 cm, 其一端被土工织物或乳胶膜包裹用于注浆撑胀形成节泡, 另一端与注浆装置相连。填入模型箱的砂土干密度为 1.460 g/cm^3 , 含水率为 0%。

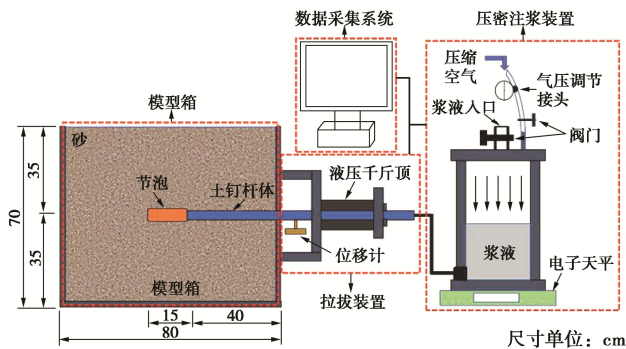


图 16 拉拔模型试验装置

Fig. 16 Test device for pull-out model

在水灰比为 0.5, 浆液体积为 $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 和注浆压力为 300 kPa 的条件下开展了土工织物和乳胶膜式压密注浆土钉的两组对比拉拔试验 (见图 17)。由土工织物和乳胶膜注浆形成的节泡直径分别为 6.3, 6.8 cm, 试验后发现: 土工织物式土钉在节泡表面生成了滤饼, 最终沿滤饼表面发生破坏, 而乳胶膜式土钉最终沿乳胶膜 (节泡) 表面发生破坏。试验结果表明, 虽然乳胶膜式土钉的节泡直径略大于土工织物式土钉的节泡直径 (包含滤饼厚度), 但是采用土工织物后, 浆液的黏性物质渗入土体使其强度提高, 进而使土钉的抗拔力明显高于采用乳胶膜时的抗拔力。因此, 对比拉拔试验证明了采用土工织物改进压密注浆土钉的抗拔性能是具有显著优势的。

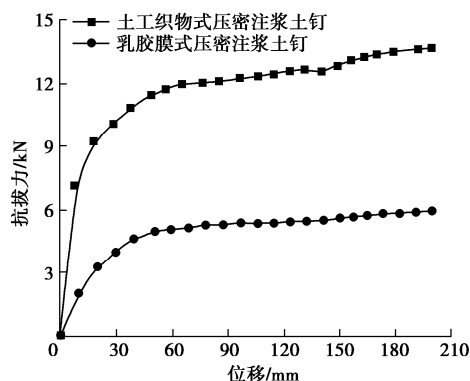


图 17 两种土钉的抗拔力

Fig. 17 Pull-out forces of two soil nails

4 结 论

本文通过室内试验研究了土工织物对水泥浆液的反滤性能, 探明了反滤后水泥试块强度 (节泡强度) 和周围土体强度提高的原因, 并评估了采用土工织物改进压密注浆土钉的优势, 最后通过对比拉拔试验进行了直接验证。主要结论如下:

(1) 土工织物的反滤效率受初始水灰比影响较大。反滤结束时间随初始水灰比的增加逐渐增加, 但增加速率逐渐降低, 且初始水灰比越高, 反滤后节泡周围砂土的峰值贯入应力越小, 残余贯入应力越大。

(2) 浆液体积对最终水灰比影响不大。通过反滤结束时间与浆液体积的线性关系, 可以准确预测压密注浆土钉在不同节泡尺寸时注浆结束时间, 以便及时清理设备。

(3) 注浆压力较小时, 对土工织物反滤效率影响较大, 随着注浆压力的增大, 该影响迅速减小。在实际工程中, 可以通过校准控制注浆压力, 进而预测和调控所形成的节泡尺寸, 便于设计和施工。

(4) 反滤后, 水泥浆液的水灰比显著降低, 从而提高了节泡的强度。初始水灰比越大, 强度的提高越显著。应注意的是, 水泥浆液中的黏性物质 (如硅酸三钙) 在反滤过程中进入周围土体 (土体强度提高), 导致节泡强度的提高效率小于 100%。另外, 采用土工织物后, 该土钉的抗拔力明显高于采用乳胶膜的抗拔力。因此, 采用土工织物的土钉不仅能避免节泡空洞, 而且能使节泡的强度、节泡与土钉杆体的黏结强度以及周围土体强度得到显著提高, 从而使土钉具有更好的抗拔性能。

(5) 本文的反滤试验是在砂土中开展的, 存在一定的局限性。对于其他土体类型, 尤其是低渗透性的土体, 对土工织物的反滤性能影响显著, 值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 叶新宇, 彭锐, 马新岩, 等. 压密效应对新型压密注浆土钉的强化研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1649 - 1656, 1738. (YE Xin-yu, PENG Rui, MA Xin-yan, et al. Enhancement of compaction grouting on a compaction-grouted soil nail in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1649 - 1656, 1738. (in Chinese))
- [2] YE X Y, WANG S Y, LI Q, et al. Negative effect of installation on performance of a compaction-grouted soil nail in poorly graded stockton beach sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(8): 04020061.
- [3] YE X Y, WANG S Y, WANG Q, et al. Numerical and experimental studies of the mechanical behaviour for compaction grouted soil nails in sandy soil[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 90: 202 - 214.
- [4] YE X Y, WANG S Y, XIAO X, et al. Numerical study for compaction-grouted soil nails with multiple grout bulbs[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(2):

- 04018193.
- [5] 唐琳, 唐晓武, 孙凯. 不等轴双向拉伸无纺布物孔径变化理论研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(12): 3597–3603. (TANG Lin, TANG Xiao-wu, SUN Kai. Analytical solutions for pore size of nonwoven geotextiles under unequal biaxial tensile strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(12): 3597–3603. (in Chinese))
- [6] PALMEIRA E M, TATTO J. Behaviour of geotextile filters in armoured slopes subjected to the action of waves[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, **43**(1): 46–55.
- [7] ALVAREZ I E, RUBIO R, RICALDE H. Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, **25**(4/5): 233–241.
- [8] LAWSON C R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering[J]. Geosynthetics International, 2008, **15**(6): 384–427.
- [9] TALAMKHANI S, NAEINI S A. The undrained shear behavior of reinforced clayey sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, **39**(1): 265–283.
- [10] YEE T W, LAWSON C R, WANG Z Y, et al. Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Eco-City, China[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, **31**: 39–50.
- [11] 杨春和, 张超, 李全明, 等. 大型高尾矿坝灾变机制与防控方法[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 1–17. (YANG Chun-he, ZHANG Chao, LI Quan-ming, et al. Disaster mechanism and prevention methods of large-scale high tailings dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(1): 1–17. (in Chinese))
- [12] 乐超, 徐超, 吴雪峰, 等. 两种塑料排水板滤膜淤堵特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2529–2534. (LE Chao, XU Chao, WU Xue-feng, et al. Experimental research on clogging characteristic of two types of PVD filters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2529–2534. (in Chinese))
- [13] 唐琳, 唐晓武, 王艳, 等. 不等轴双向拉应变下有纺织物孔径变化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1535–1540. (TANG Lin, TANG Xiao-wu, WANG Yan, et al. Experimental study on pore size characteristics of woven geotextiles subjected to unequal biaxial tensile strains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1535–1540. (in Chinese))
- [14] 余巍, 陈轮, 王钊. 无纺土工织物保土应用中的概率设计准则[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2052–2054, 2059. (SHE Wei, CHEN Lun, WANG Zhao. A probabilistic criterion for nonwoven geotextiles retention application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2052–2054, 2059. (in Chinese))
- [15] 吴纲, 雷国辉, 姜红. 有纺土工织物覆土条件下的渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 1): 161–165. (WU Gang, LEI Guo-hui, JIANG Hong. Experimental study on permeability of woven geotextile covered with soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 161–165. (in Chinese))
- [16] 汪帅, 庄艳峰, 邓洪, 等. 双向拉伸与水流条件对反滤系统性能的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, **49**(2): 264–268. (WANG Shuai, ZHUANG Yan-feng, DENG Hong, et al. Influences of bidirectional tensile strain and flow conditions on geotextile filtration[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, **49**(2): 264–268. (in Chinese))
- [17] 叶新宇, 彭锐, 张升, 等. 一种用于压密注浆土钉的土工织物性能测试系统及方法: CN110595985A[P]. 2019-12-20. (YE Xin-yu, PENG Rui, ZHANG Sheng, et al. System and Method for Testing Performance of Geotextile for Compaction Grouting Soil Nails: CN110595985A[P]. 2019-12-20. (in Chinese))
- [18] 彭锐, 马新岩, 叶新宇, 等. 一种用于压密注浆土钉的土工织物性能测试系统: CN210953739U[P]. 2020-07-07. (PENG Rui, MA Xin-yan, YE Xin-yu, et al. Geotextile Performance Testing System for Compaction Grouting Soil Nails: CN210953739U[P]. 2020-07-07. (in Chinese))
- [19] YE X Y, WANG S Y, WANG Q, et al. The influence of the degree of saturation on compaction-grouted soil nails in sand[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(4): 1101–1111.
- [20] 白彬, 唐晓武, 唐琳, 等. 等双轴拉应变对无纺土工织物孔径变化的影响[J]. 岩土力学, 2015, **36**(6): 1615–1621, 1626. (BAI Bin, TANG Xiao-wu, TANG Lin, et al. Influence of equal biaxial tension on opening sizes of nonwoven geotextiles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(6): 1615–1621, 1626. (in Chinese))
- [21] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 2003. (Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete: GB/T 50081—2002[S]. 2003. (in Chinese))
- [22] LI X X, WU Z M, ZHENG J J, et al. Effect of loading rate on the bond behaviour of deformed steel bars in concrete subjected to lateral pressure[J]. Materials and Structures, 2016, **49**(6): 2097–2111.
- [23] CAO L, GUO J T, TIAN J H, et al. Preparation of Ca/Al-Layered Double Hydroxide and the influence of their structure on early strength of cement[J]. Construction and Building Materials, 2018, **184**: 203–214.