

粉细砂地层条件下声频振动注浆的试验研究

马成伟^{1,2}, 王贵和¹, 肖晓阳¹, 王 瑜^{1,2}, 刘宝林^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 国土资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

摘要:粉细砂地层加固处理工作一直是工程界研究的重点课题,采用传统注浆工法很难达到预期效果。针对此种情况,近年来提出振动注浆法,然而目前的振动注浆模拟试验与实际工况有较大出入,故创新设计了试验装置,可以满足自由调控振动频率,且振动效果与实际工况接近。通过室内静压注浆试验及声频振动注浆试验,对比注浆效果,得出以下结论:压力相同条件下,相比静压注浆,振动注浆可以有效增大注浆量且加固效果更优;振动频率的适当增加可以有效加快注浆速度,增大注浆量,这对于工期紧张的工程具有一定的实际意义,但频率过高并非完全有利于注浆效果,要根据实际工况选择最优注浆频率;高频振动下,振动时间的延长对注浆效果的增益较小。

关键词:粉细砂地层;静压注浆;声频振动注浆;模拟试验;浆液扩散机理

中图分类号: TU755.6; TV543; U445.55; TD353 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)03-0058-07

Experimental Study on Audio Frequency Vibration Grouting in Fine Silty Sand Layer/MA Cheng-wei^{1,2}, WANG Gui-he¹, XIAO Xiao-yang¹, WANG Yu^{1,2}, LIU Bao-lin^{1,2} (1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory on Deep Geo-drilling Technology of the Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The reinforcement processing of fine silty sand layer has been the important subject in the engineering field, for it is hard to achieve the desired effect by the traditional grouting method. In view of this situation, the vibrating grouting method is put forward in recent years. However, there are many discrepancies between present vibration grouting simulation tests and the actual working conditions. A test device has been creatively designed, which can satisfy the regulation of freedom vibration frequency and vibration effects is closed to the actual conditions. Comparing the grouting effects of the indoor static pressure grouting test to the audio frequency vibration grouting test, the following conclusions are presented: under the same pressure, the vibration grouting can effectively increase the grouting quantity with better reinforcement effect compared with the static pressure grouting; the appropriate increase of vibration frequency can effectively accelerate the speed of grouting and increase the grouting quantity which has certain practical significance for the project with time limit. However too high frequency is not totally beneficial to the grouting effect, it is crucial to select the optimum grouting frequency according to the actual condition. Under high frequency vibration, the extension of time has less influence to the grouting effect.

Key words: fine silty sand layer; static pressure grouting; audio frequency vibration grouting; simulation test; grouting diffusion mechanism

0 引言

注浆作为一种特殊的施工方法,在土木、水利、矿山、交通等许多领域中得到了广泛的应用^[1]。目前存在和正在研究的注浆工艺大体可以分为渗透注浆、压密注浆、劈裂注浆、高压喷射注浆等。现有的注浆方法虽然已发展得较为成熟,但对于一些特定场地,注浆效果还很不理想,如饱和细砂土和粉土地层。针对饱和细砂土和粉土地层不易注入的情况,早前提出一种新的注浆方法——振动注浆法,该法拟通过振动机具的冲击振动,使得砂土的孔隙水压

力上升,有效应力减少,抗剪强度降低,进而在地基内形成软化区,然后利用注浆管将浆液压入砂土中,由于注浆管周围软化区的存在,浆液很容易使砂土产生挤压变形,从而压密注浆点附近的土体,或容易使砂土的结构破坏,产生劈裂效应,从而增大砂土的可灌性和浆液的扩散距离,达到减小渗透性,防止管涌的目的^[2]。振动注浆施工中,利用振动力可以改善注浆环境。近年来,振动注浆已成为处理软弱地基的一种新的趋势。

收稿日期:2016-07-20; 修回日期:2016-08-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目“声频振动钻进系统共振机理及能量传递规律研究”(编号:41672366);北京市优秀人才项目“声频振动钻进工艺技术研究”(编号:2013D009015000002)

作者简介:马成伟,男,汉族,1992年生,硕士研究生在读,地质工程专业,研究方向为基础工程设计与施工,北京市海淀区学院路29号,1530296284@qq.com。

1 国内外研究现状

振动注浆作为一种新兴的注浆技术,其应用范围正在扩大,国内外学者在这方面也做了大量研究,研究主要包括以下几方面。

1.1 关于饱和砂土液化的理论研究

1975年,Ishihara用有效应力路径确定残余孔压^[3],能够清晰地反映饱和砂土由开始振动到初始液化所经历的路径,有助于理解振动孔隙水压力的起伏波动性。2005年,Sung-sik Park提出土壤液化分析模型,认为研究分析土体骨架应变是最重要的,因为土壤骨架控制其液化反应^[4]。同年,凌晨引入概率统计法和相似比设计法,求得了两个液化判别式,对于大埋深,不确定因素较多的地下土体,能够满足精度要求^[5]。2011年,李晓广利用静力触探仪测得不同工况条件下粉细砂锥尖阻力,对比分析发现存在一个临界液化时间,超过临界液化时间,液化效果将不会随之增加;在振动荷载作用频率与砂土固有频率接近时,因为存在共振效应,此时砂土液化效果最为明显^[6]。2015年,Ecemis Nurhan进行了循环荷载对砂土再液化的影响研究,发现在初次液化后,相对密度显著增加并不意味着增加再液化的负载周期^[7]。

1.2 关于振动注浆的可行性研究

1997年中南大学提出振动注浆的概念,2002年,周海林对振动注浆中砂土的振动响应以及振动注浆原理进行了研究,认为振动注浆过程中浆液很容易使砂土产生挤压变形,或使土体产生劈裂效应,从而增大砂土的可灌性和浆液的扩散距离,达到减少渗透的目的^[2,8]。2005年,凌晨自行设计振动注浆器具进行了振动注浆实验,结果表明振动液化后确实较先前易于注浆,这验证了振动注浆这一新思想的可行性^[5]。

1.3 关于振动注浆浆液扩散理论研究

1996年,Ohashi A对细小裂隙的动力注浆进行了试验研究。研究发现,在振动注浆中,当使用的浆液较稠时,浆液很难通过劈裂、渗透等形式进入土体,而是以压密的形式置换土体^[9]。2010年,雷金山采用套叠屈服面模型对饱和砂土振动注浆进行了数值模拟,对被注土体孔压变化以及变形进行了研究^[10]。

1.4 关于砂土动力特性的研究

2003年,ChiYong Song提出了一种动态分析饱和颗粒土中波的传播特性的数值框架^[11]。

2005年,Tong Qiu发现孔隙水压力对两相饱和

砂土的动力响应作用主要表现在有效密度和液压阻尼^[12]。2011年,李晓广研究发现在高频振动下粉细砂表观粘度显著减小,液化后粉细砂的特性仍属于非牛顿流体,符合幂律流体^[6]。2014年,W. Wang在轴对称、小应变、完全耦合情况下,基于热渗流力学(TPM)采用有限元分析饱和砂土土壤结构之间相互作用^[13]。

1.5 关于振动注浆机具的理论研究

2006年,薛渊对振动注浆的激振器力学问题进行了研究,着重针对载荷的变化引起振幅、激振力、输入力矩、功率、超前角这些体现振动器输出特性^[14]的参数进行理论分析。同年,孙斌堂直接针对振动注浆机具振源设计的需要,根据实际地震液化资料和室内土动力液化试验资料,基于土体液化影响因素多元拟合相关性分析结果,通过概率处理的办法求解土体动力液化的概率模型判别式^[15]。通过该概率模型判别式,可以建立振动注浆机具的振源特性与土的特性和埋深、振动持时之间关系,从而为振动注浆机具的研制提供必要的振源设计参数。

2 声频振动注浆的基本理论分析

2.1 粉细砂地层的工程性质

粉细砂主要指粒径 $<0.25\text{ mm}$ 的颗粒含量占总质量的50%以上,且粒径 $>0.075\text{ mm}$ 的颗粒也占总质量的50%以上的砂土。对粉细砂地层进行注浆加固,主要是通过注浆把松散的粉细砂变得致密、均匀,从而减少滑动面的产生,降低塌方等工程事故的发生率。在粉细砂地层中注浆的一大特点是地层变形较大且挤密强化作用较小。在注浆时,由于注浆材料的作用,地层会产生变形、破坏。粉细砂地层注浆的另一大特点是注浆材料极易在受压条件下泌水,致使浆液水灰比发生变化,从而使注浆材料的使用性能也随之发生变化。要在粉细砂地层注浆产生较好的注浆效果,需满足注浆材料在地层中可以形成致密的脉状结构,且使用性能保持稳定。

2.2 粉细砂地层注浆材料的选用

在注浆技术发展早期,人们主要运用水泥作为注浆材料进行堵水加固,1920—1940年期间,水玻璃浆材成为新的主要化学浆材,到1945年以后,化学浆材发展迅速,尤其是近几十年来,有机高分子注浆材料由于具有对环境污染小、较高的强度以及施工方便快捷的优势,因而得到飞速发展。

普通水泥由于其颗粒粒径较大且粗颗粒较多,在渗透系数较低的粉细砂地层中很难被应用,可注性较差。超细水泥是在普通水泥的基础上进行开发创新出的一种新型浆材,对于渗透系数较低的砂质地层,可以采用超细水泥,但是考虑到工程造价问题,超细水泥的应用范围并不是很广。

化学类浆材具有强度高、可注性好、耐久性好的优点,但是大多数化学类浆材不仅价格很高,而且容易对周围的环境尤其是水环境造成不同程度的毒性污染,目前很多的国家已禁止使用此类浆材。由于化学类浆材的优点,一些无毒的化学类浆材仍然存在一定的市场应用率。

水玻璃类浆材可分为酸性水玻璃和碱性水玻璃,凝胶时间的调整范围较大,少则几秒,多则数小时。碱性水玻璃呈强碱性,与胶凝剂混合后,即在碱性条件下发生凝胶,同时被注浆地层中生成的二氧化硅胶体发生脱水收缩现象,降低了被注地层的耐久性;酸性水玻璃一般采用单液注浆的方式注入地层,与地层中的碱性物质发生中和作用,进而凝胶、形成固结体从而增加了耐久性。凝胶后砂层固砂体强度较低,在0.1~0.6 MPa之间,所以酸性水玻璃浆液不适用于上载结构过于沉重的建筑物基础加固等。但是对于需要临时支护的工程结构尤其是隧道在开挖时的临时加固中,酸性水玻璃浆液具有很大的使用价值。

对比总结以上3种浆液优缺点发现,酸性水玻璃浆液比较适宜室内试验的研究。其化学分子式表达为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$,分子式中的系数 m 称为水玻璃的模数。通常情况下,水玻璃的模数大小一般在1~4之间,而实用价值比较大的水玻璃的模数一般在1.5~3.5之间。水玻璃模数的大小对浆液质量的好坏具有重要意义,模数越大, SiO_2 的含量越高,浆液则越粘稠,胶凝时间越短,固结体的强度也就越高;相反的,模数越小, SiO_2 的含量越低,浆液则越稀释,胶凝时间越长,固结体的强度也就越低。注浆时,选择模数在2.5~3.5之间的水玻璃最为恰当。

2.3 注浆选材的流变性

浆液的粘度值反映了浆液的流变性,浆液的粘度愈小,浆液在渗流过程中所受到的阻力愈小,浆液在土体中扩散的就越远。反之,浆液的粘度越大,浆液流动过程中所受到的阻力也越大,浆液越难以扩散。由此可知浆液在地层中的扩散规律与浆液的流变性有非常大的关系,所以在分析浆液在土体中的

渗透模型之前,有必要了解一下浆液的流变性。

振动注浆过程中浆液在地层中会产生3种作用方式,即牛顿流体在地层中渗透注浆、压密注浆和劈裂注浆,在模拟试验的过程中,渗透注浆与压密注浆为主要的注浆作用模式,而劈裂注浆的作用形式少量存在,在此不多做阐述。

2.3.1 牛顿流体在地层中的渗透注浆

牛顿流体在多孔介质中具有代表性的渗透注浆理论模型有球面扩散理论模型、柱面扩散理论模型。在渗透注浆中,注浆的方式决定了固结体的形状,当单独采用注浆管端孔注浆时,注浆的固结体呈球形,适用于球形扩散理论模型;当单独采用注浆花管注浆时,注浆的固结体呈柱形,适用于柱形扩散理论模型;当采用注浆花管与端孔联合注浆时,浆液将呈柱面-球面扩散,具体参见图1。

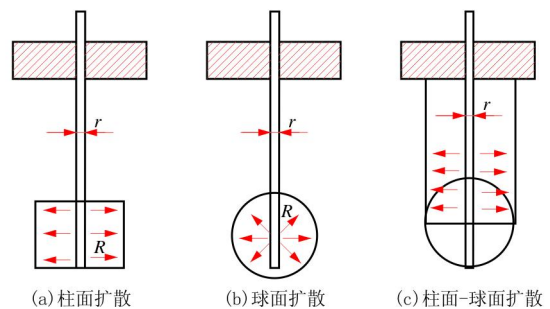


图1 注浆浆液扩散形式图

2.3.2 牛顿流体在地层中的压密注浆

压密注浆是将密度较大的浆液通过钻孔注入到土体中,在出浆口形成浆泡。而浆泡会压缩周围的土体,并且在其附近区域形成大的塑性变形区。而距离浆泡较远的区域的土体会发生弹性形变,因此土的密度会明显增加(如图2)。刚开始进行压密注浆时,浆泡的直径和体积均较小,且压力主要是水平方向的。通常形成的注浆体形状并不规则,这主要是由所注土层的地质条件和所选择的注浆工艺所决定的;如果单个浆泡的形状近似于球形,则浆液是从注浆管的底部注入的;如果浆泡不再是球形,而是近似于柱形,则浆液是从注浆花管中的某一段注入的。

3 粉细砂地层的声频振动注浆模拟试验

3.1 浆液配比及测试

3.1.1 浆液配比

试验所采用的试剂为市售的水玻璃(模数为3.3,波美度为40°)和浓硫酸(质量分数为98%)。

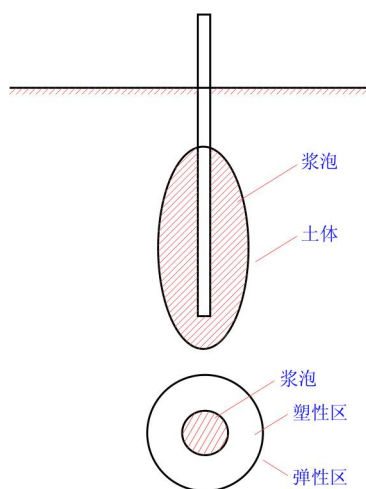


图 2 压密注浆加固机理图

试验时,首先将水玻璃稀释到 30',将 98% 浓硫酸稀释成 10% 的稀硫酸。根据试验需求,凝胶时间需控制在 10 min 以上。试验时采用甲液为浓度 10% 的稀硫酸,乙液为波美度 30' 的水玻璃溶液,将甲液缓慢倒入乙液的同时运用玻璃棒不断搅拌直至混合完毕,同时采用倒杯法确定凝胶时间,多次配比进行试验,最终确定采用的浆液中 2 种浆材的体积比为稀硫酸:水玻璃=3:4 时,凝胶时间约为 12 min。

3.1.2 粘度测试

浆液配制完成之后采用六速旋转粘度计对其进行粘度测试。经六速旋转粘度计测试得出,浆液初始粘度约为 $3.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

3.2 声频振动注浆试验装置的研制

国内的多位专家学者在过去 10 年当中对振动注浆工艺进行相关室内试验研究,但所用方法以及设备均与现实施工状况相差较大,为了更好地模拟实际场地施工条件,需在前人采用振动台恒定振动频率且横向振动的基础上进行改良,以期将振动频率可调,且与现场实际施工情况时的竖向且整体的振动更为接近。

试验装置原理如图 3 所示,试验装备由高位水桶的压力注浆装置、球形阀门、振动器、振动钻杆、砂土容器等组成。振动器与升降机通过高强螺栓加固,中间夹有橡胶板以缓冲振动器横向的振动效果,实物图如图 4 所示。试验用振动设备为进口森立玛电机,最大振动频率为 150 Hz,变频设备为国产富士 5000G11 型变频器,试验时将变频器与振动器相连,试验实物连接如图 5 所示。

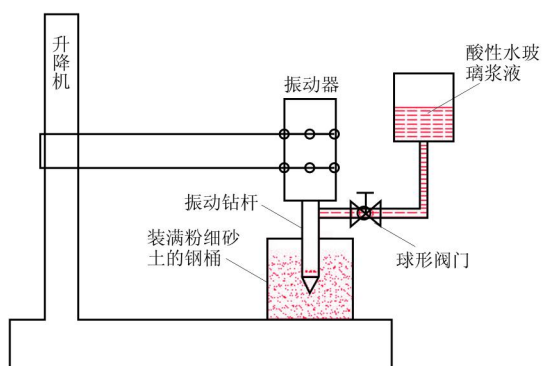


图 3 声频振动注浆试验装置原理图



图 4 声频振动注浆试验装置实物图



图 5 声频振动注浆所用变频器实物连接图

该装置可模拟粉细砂地层在不同注浆压力及振动频率情况下的振动注浆试验,对于传统的振动注浆模拟试验来说,具有极大的改进,更加贴合实际工况,主要优点如下:(1)装置较小,可在较小的室内空间中进行试验;(2)易于安装,操作简单;(3)适用性较广,可模拟不同的注浆压力以及不同的振动频率。

3.3 试验操作流程

(1)调整钻架角度:钻机需平置于牢固坚实的地

方,进行水平、垂直校正,钻杆(注浆管)保证竖直。

(2)下钻:向实验容器内逐步添加粉细砂土,并逐层压实,直至填至距离桶顶5 cm处;将钻杆顺利置入预定位置,在下钻过程中,喷嘴要用塑料布包裹,以免泥土堵塞。

(3)试孔:当钻杆置入土层预定深度后应用清水试压,若注浆设备和管路安全正常,则可配置水玻璃浆液开始实验。

(4)静压注浆模拟实验:对粉细砂地层进行静压注浆模拟试验,控制注浆管埋深,选用不同注浆压力,比对注浆体形态,选出最佳注浆压力,为振动注浆试验奠定基础,并将得到的注浆效果与随后进行的声频振动注浆的效果进行对比。

(5)声频振动注浆实验:进行3组对照试验从而对振动注浆的效果进行分析,第一组试验为相同注浆压力条件下,不同振动频率对振动注浆效果的影响;第二组为相同注浆压力条件下,观察不同振动频率注入相同浆液量所需时间的变化;第三组为相同注浆压力和振动频率条件下,在不同振动时间内的注浆量变化情况以及注浆后所凝结注浆体的扩散半径。

(6)注浆结束与提钻:在注浆过程中往往有一定数量土粒随着一部分浆液沿着注浆管冒出地面,通过对冒浆观察,冒浆量小于注浆量20%为正常现象;超过20%,应查明原因,采取相应的措施。当砂土表层大幅度冒浆时,注浆即告结束。

(7)浆液冲洗:当试验结束后,及时清洗注浆泵、输浆管路、注浆管及喷头。

(8)收集整理实验数据:实验过程中记录振频、振动持时、注浆压力、注浆量,注浆结束24 h后,将试验粉细砂土地层小心开挖,获得固结的注浆体,测量注浆固结体直径,并观察注浆扩散规律。

(9)确立砂土的声频振动响应特性:整理数据,分析注浆压力、振动频率、土层埋深与扩散半径及注浆量的变化规律,建立声频振动机具的振源特性与土的特性和埋深、振动持时之间关系。

3.4 静压注浆模拟实验结果与分析

3.4.1 静压注浆模拟实验结果

本次试验共进行7组,将粉细砂土体分别在60、70、80、90、100、110、120 cm的注浆高度下各进行一次试验,其对应注浆压力分别为6.6、7.8、8.9、10、11.1、12.2、13.3 kPa。待注浆结束24 h后,开挖

土体,得到注浆固结体,观察固结体的外形并测量其直径,根据试验结果得出静压注浆规律(见表1)。

表1 静压注浆扩散规律总结

注浆压力/ kPa	浆液扩散 半径/cm	注浆量/ mL	注浆停止 时间/s	是否冒浆
6.6	3.25	258	67	否
7.8	3.80	325	79	否
8.9	4.30	408	88	否
10.0	5.00	510	80	是
11.1	5.65	574	65	是
12.2	6.15	648	36	是
13.3	6.60	680	30	是

在静压注浆过程中,当注浆压力达到8.9 kPa时,试验出现轻微冒浆现象;当注浆压力继续增大时,冒浆现象将会更加明显,同时冒浆速度也会加快。现将表1中注浆扩散半径随注浆压力的变化用图6表示出来。通过图6可以更为直观地看出浆液扩散半径随注浆压力的增大而不断增大的趋势。

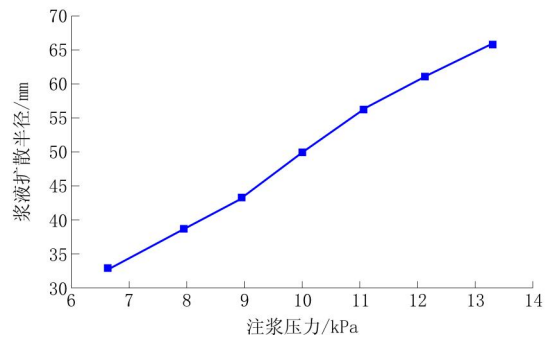


图6 静压注浆扩散半径随注浆压力的变化图

3.4.2 静压注浆实验分析

根据试验记录,可知随着注浆压力的不断变大,注入粉细砂土中的浆液量不断增多,同时浆液在土体中的扩散半径也逐渐变大;但当高位浆液桶的高度升到90 cm时,即注浆压力增大到10.0 kPa时,在钢桶内将会出现冒浆现象,可以确定此时的注浆压力大于注浆钻杆在土体内的上覆土层的压力,浆液随着注浆压力的增大,冒浆现象也出现的更快。因而选择60 cm作为振动注浆时的注浆高度,将注浆压力对注浆扩散效果的影响减小到最小,从而可以更加清晰的观察振动对于注浆的影响效果。

3.5 声频振动注浆模拟实验结果

3.5.1 第一组试验

本组试验保持注浆压力为6.6 kPa,在12组不同振动频率即10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60 Hz的情况下进行注浆工作,达到注浆要求后停止注

浆,意在观察振动频率对注浆扩散效果的影响。待注浆结束 24 h 后,开挖土体,得到注浆固结体,观察固结体的外形并测量其直径。12 组不同振动频率条件下的注浆数据如表 2 所示,变化规律见图 7。

表 2 注浆压力相同情况下不同振动频率注浆规律

振动频率/ Hz	扩散半径/ cm	注浆量/ mL	注浆停止 时间/s	是否冒浆
5	3.30	260	65	否
10	3.50	273	72	否
15	3.92	345	80	否
20	4.00	360	85	否
25	4.25	410	87	否
30	4.40	450	90	否
35	4.70	492	94	否
40	5.40	556	99	否
45	5.80	620	60	是
50	6.20	665	36	是
55	6.50	684	25	是
60	6.80	698	15	是

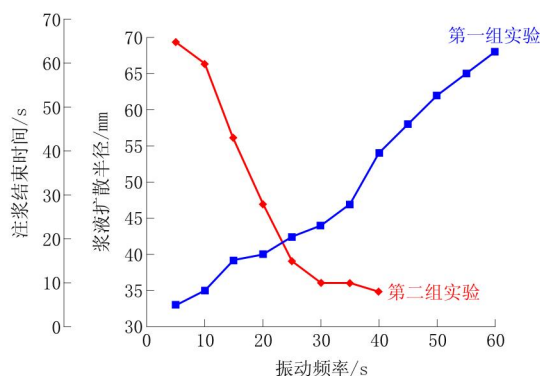


图 7 注浆效果随振动频率的变化图

通过试验,可以发现以下规律:

(1)当注浆压力相同时,与静压注浆相比,对粉细砂土进行振动,可以增大注浆量并且增加浆液在粉细砂土中的扩散半径。

(2)随着振动频率的增加,浆液的扩散半径也逐渐增加,可以有效扩大浆液在粉细砂土中的加固体积。

(3)通过具体数值可以发现,当振动频率控制在 10 Hz 以内时,即振动频率较低时,注浆半径会扩大,但是扩散效果不是很明显;在 10 ~ 40 Hz 之间,随着振动频率的增加,浆液的扩散半径会显著增加,同时注浆速度更快,注浆量也逐渐增多;但是当振动频率增大到 40 Hz 以上时,注浆量以及注浆扩散半径会继续增大,注浆速度也会显著增快,不过注浆时冒浆现象会逐步加快。

另外可以发现,当注浆压力为 6.6 kPa,振动频率调至 60 Hz 时,其注浆扩散效果与静压注浆压力为 13.3 kPa 时相差无几,固结体如图 8 所示。



图 8 压力 6.6 kPa、频率 60 Hz 振动注浆与压力 13.3 kPa 静压注浆固结体对比图

3.5.2 第二组试验

选择注浆量为 260 mL,同时为确保在振动时不冒浆,选择振动频率范围为 5 ~ 40 Hz,观察相同注浆量的情况下,振动频率的增加能否加快注浆速度。根据试验,记录数据,将注浆结束时间随振动频率的变化规律在图 7 中表示出来。

根据试验数据可知:当振动频率在 10 Hz 以内时,注浆用时变化较小,只有较小程度加快;当注浆频率在 10 ~ 30 Hz 之内变化时,注浆速度显著提高;而当注浆频率增大到一定程度时,即 30 ~ 40 Hz 时,注浆速度又会减缓下来,基本维持不变。

3.5.3 第三组试验

根据第一组试验,已知当注浆压力为 6.6 kPa,振动频率为 40 Hz 时注浆结束时间为 99 s。现保持相同注浆条件,即注浆压力为 6.6 kPa,振动频率为 40 Hz,每次注浆桶内浆液量均保持为 2100 mL,分别控制注浆时间为 20、40、60、80、99 s,观察浆液在不同时间段的扩散规律,意在研究振动时间的长短对于注浆体扩散半径的增大是否有利。整理数据,将注浆扩散半径随振动注浆时间的变化规律用图 9 表示。

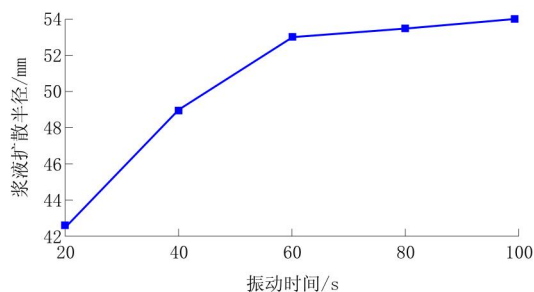


图 9 浆液扩散半径随振动时间变化规律图

由试验数据可以观察到,在振动条件下,注浆前期,注浆扩散速度较快,固结体的半径增大速度也较快,而随着振动时间的增长,注浆体扩散半径会继续增加,只是增大速度会相对减缓。从整体来讲,振动时间的增加有利于增大注浆量,加大注浆加固面积。

3.6 试验结果与分析

通过试验,可以发现以下规律:

(1)当注浆压力保持相同时,对粉细砂土进行振动,可以增大注浆量并且增加浆液在粉细砂土中的扩散半径。

(2)随着振动频率的增加,浆液的扩散半径也逐渐增加,可以有效扩大浆液在粉细砂土中的加固体积。

(3)当振动频率逐步增大时,注浆速度也会显著增快,不过注浆时冒浆现象也会更易发生。

(4)在振动条件下,注浆前期,注浆扩散速度较快,固结体半径增大速度也较快,而随着振动时间的增长,注浆体扩散半径会继续增加,只是增大速度会相对减缓。从整体来讲,振动时间的增加有利于增大注浆量,加大注浆加固面积。

4 结论

选择酸性水玻璃浆材作为注浆材料,采用自行设计制作配套振动注浆所需的试验器具,在不同的条件下进行多组注浆试验,得出了粉细砂地层在此试验条件下的注浆扩散规律:相同压力情况下,振动注浆可以有效增大注浆量并且注浆加固效果更优;振动频率的适当增加可以更有效地增大注浆量,但频率的一味增大并非完全有利于注浆效果,要根据实际地层选择最优注浆频率,否则会出现冒浆现象,同时振动频率的增大相当于增大一定的注浆压力;振动频率的增加可以有效加快注浆速度,这对于赶工期的工程具有一定的实际意义;相同压力及不冒浆前提下,振动时间的增加有利于逐步加大注浆量,增大注浆加固面积。

模拟试验的结果从多方面验证了振动法较传统方法易于注浆,不论是从注浆速度还是注浆效果,均有较为显著的提高。并且从浆液扩散情况来看,在振动条件下注浆浆液会以渗透、压密、劈裂等多种方式进入土体,加固土体,这为后面进一步的理论研究奠定基础。

由于振动注浆问题的复杂性,目前研究尚存在很多不足,仍有许多方面值得完善、深入和拓展,归纳起来理论研究应在如下几个方面。

(1)室内试验虽然总结了振动注浆扩散规律,但对于理论分析方面尚存在不足,不能根据主要影响因素量化推断出浆液在液化后粉细砂土层中的作用范围。

(2)室内试验不能对土层压力进行详细模拟,而这在实际工程中是必然存在的,必须考虑这方面因素,以期得到真实有效的定量分析公式。

参考文献:

- [1] In-Mo lee, Jae-Sung Lee, Seok-Woo Nam. Effect of seepage on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting[J]. Tunnel and Underground Space Technology, 2004, 19: 551 - 565.
- [2] 周海林. 振动注浆中的砂土振动响应研究[D]. 湖南长沙:中南大学, 2002: 23 - 32.
- [3] Ishihara K. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stress[J]. Soil and Foundation, 1975, 15(1): 13 - 28.
- [4] Sung-sik Park. A two mobilized-plane model and its application for soil liquefaction analysis[D]. Canada: The University of British Columbia, 2005: 178 - 182.
- [5] 凌晨. 振动注浆中砂土液化判别与浆液扩散规律模拟研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005: 26 - 42.
- [6] 李晓广. 高频机械振动下的砂土液化特性及其应用[D]. 上海:上海大学, 2011: 2 - 15.
- [7] Ecemis Nurhan. Influence of consolidation properties on the cyclic re-liquefaction potential of sands[J]. Bull Earthquake Engineering, 2015, (13): 1655 - 1673.
- [8] 王星华, 周海林, 杨秀竹. 振动注浆原理及其理论基础[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007.
- [9] Ohashi A, Nishihama J, Taira O, et al. Study on dynamic injection into small fracture[C]// Tokyo: Grouting and deep mixing, Pro. Conference, 1996: 701 - 706.
- [10] 雷金山, 阳军生, 杨秀竹. 饱和砂土振动注浆的有限元模拟[J]. 振动与冲击, 2010, (9): 235 - 237.
- [11] ChiYong Song. Numerical formulation for a dynamic analysis of the plastic behavior in saturated granular soils[D]. The Ohio State: The Ohio State University, 2003: 101 - 135.
- [12] Qiu, Tong. Theoretical and numerical investigations of the effects of pore fluid on the dynamic behavior of saturated soils[D]. Los Angeles: University of California, 2005: 197 - 203.
- [13] W. Wang. Coupled Axisymmetric Thermo-Poro-Mechanical Finite Element Analysis of Energy Foundation Centrifuge Experiments in Partially Saturated Silt[J]. Geotech Geol Eng, 2015, 33: 373 - 388.
- [14] 薛渊, 陆念力, 凌贤长. 振动注浆激振器力学分析[J]. 建筑机械, 2006, (4): 61 - 65.
- [15] 孙斌堂, 凌晨, 凌贤长. 土体液化判别方法在振动注浆机具研制中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, (5): 160 - 161.