

吹填土地基处理技术的宏细观 机理初步研究

周 健^{1,2}, 王 磊¹, 贾敏才^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要:本文首先对作者提出的两种大面积吹填土地基处理技术(无填料振冲法和低能量强夯联合真空井点降水法)进行了介绍和总结,并在现场试验的基础上,通过室内模型试验,对这两种处理方法的宏细观加固机理进行初步探索和研究。本文的研究工作不仅对两种地基处理方法的施工工艺的改进和完善具有一定的指导意义和参考价值,而且为地基处理机理研究中建立宏观力学和细观力学之间的响应特性开辟一种新的方法和途径。

关键词:吹填土;无填料振冲法;低能量强夯联合真空井点降水法;宏细观机理

作者简介:周健,(1957—),浙江临海人,教授,博士生导师,主要从事土动力学、地基处理和数值模拟方面的研究。E-mail:tjuzj@vip.163.com。

0 引 言

随着经济的发展和城市基本建设的蓬勃开展,对土地资源的要求日益迫切,将疏浚出来的吹填土用来填海造陆,已成为沿海城市缓解土地资源紧张的重要途径。而填海造陆面临的最大问题就是大面积吹填土地基处理。无填料振冲法和真空动力固结法与一般地基处理方法(真空堆载预压、搅拌桩、碎石桩、砂桩等)相比在造价和工期上无疑是具有巨大优势的两种新型地基处理方法。

振冲法加固砂土类地基,始于1937年的德国,20世纪70年代中期进入我国。对于无填料振冲法,国内外一般认为仅适用于处理黏粒含量小于10%的中粗砂等粗颗粒土^[1];对于粉细砂地基,有关规范中都有明确规定,不宜采用或不能采用。因为存在一些失败工程的例子,周健^[2,3]等通过室内试验和现场试验,提出了处理粉细砂吹填土的无填料振冲方法。该方法已成功应用于上海外高桥港区四、五期工程,山洋深水港工程和上海罗泾港二期工程等大面积地基处理,取得了显著成效。

强夯法是法国梅那(Menard)技术公司1969年首创的一种地基加固方法。由于该法具有设备简单、节约三材、工期短、费用低等优点,一经

推广就获得了大量应用,20世纪70年代引入我国后也很快在全国各地得到了推广。目前,公认强夯技术虽然在处理碎石土、砂土、湿陷性黄土、杂填土和低饱和度黏土或粉土等地基的加固中得到了广泛的应用,但是对于饱和黏土,特别是淤泥、淤泥质土和泥炭土等地基的加固尚存在争议^[1]。郑颖人等^[4]利用强夯加排水板的方法对含砂饱和和软黏土的施工工艺和机理进行了试验研究,提出“先轻后重,逐级加能,轻重适度,少击多遍”的原则,周健^[5,6]等对含砂黏土和吹填粉土又提出低能量强夯联合真空井点降水的方法,并将试验研究成果成功地应用于上海外高桥港区四、五期工程、上海临港新城、上海罗泾港二期工程等的大面积吹填土地基处理工程中,取得了显著的效益。

无填料振冲法和低能量强夯联合真空井点降水法已写入正在修编的上海市标准《地基处理技术规范》中。

本文介绍和总结了这两种地基处理的技术,通过室内模型试验和现场试验,对这两种处理方法的宏细观加固机理进行初步探索和研究。本文的研究结果对两种地基处理方法的施工工艺的改进和完善,具有一定的指导意义和参考价值,并为建立宏观力学和细观力学之间的响应特性开辟一种新的方法和途径。

1 无填料振冲法

1.1 技术介绍

传统的无填料振冲法主要对象是黏粒含量小于10%的中粗砂等粗颗粒土。而笔者通过以下几项对施工工艺进行改进：①采用低水压和少水量振冲工艺；②采用多次反插复振工艺；③选择适合于粉细砂特性的振动力；④控制振冲器下降和上提速率及上提间距；⑤采用双机共振施工工艺；⑥根据粉细砂特性确定振冲密实电流和留振时间等施工参数。最终在无料振冲法加固饱和粉细砂土的试验中取得了成功，并将其推广到大面积吹填土地基处理工程中(图1)。

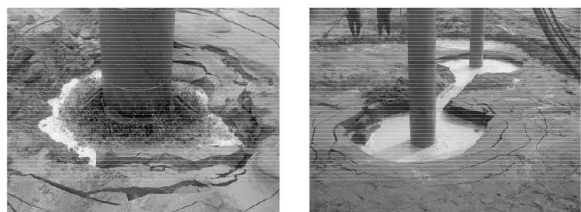


图1 洋山港无填料振冲施工现场

1.2 宏观机理分析

目前公认为振冲挤密法加固砂层，一方面是依靠振冲器的反复强力振动和高压水流使振冲器周围的砂土层发生较大面积的短暂液化，使砂土颗粒在液化后重新排列，向低势能位置转移，颗粒间孔隙减少，砂土形成更为致密的结构；另一方面依靠振冲器的水平振动力将补充的砂挤密压实，从而提高砂层的承载力和抗液化能力。笔者通过室内模型试验和现场试验进一步研究了无填料振冲法加固松散饱和吹填粉细砂的宏观加固机理，得出以下结论：

(1) 影响粉细砂无填料振冲加固效果的主要因素包括：颗粒级配、振冲方式、振冲间距、激振力等。颗粒级配较好的高粉粒含量粉细砂土的加固效果比颗粒级配均匀的低粉粒含量粉细砂土加固效果好。双机共振和三机共振的加固效果较单机振冲的加固效果好。小振冲间距的加固效果比大振冲间距的加固效果好。适当提高振冲激振力可以扩大加固影响范围和土体均匀性，但对于提高相对密度作用有限。

(2) 试验证明了吹填粉细砂土振冲后具有一定的时间效应。

(3) 当初始相对密度比较低时，吹填粉细砂具有一定的复振效应，但是当初始相对密度比较高时，振冲的复振效应不太明显。对于完全液化区外的振动挤密区，振冲复振效应比较显著，适度的多次振冲有利于该区域的进一步扩展和密实，并可以有效提高加固后砂土的均匀性。

1.3 细观机理分析

笔者通过对粉细砂和人工砂进行室内可视模型试验，模型箱由8mm厚透明有机玻璃板黏结而成，四面由木板固定，模型箱内部尺寸为68cm×32cm×50cm。利用体式显微镜的跟踪摄像和图像处理技术，对无填料振冲法的细观机理进行了初步研究，研究成果如下：

(1) 根据对振冲前后颗粒的细观变化观测和分析发现，加固后砂土颗粒间的接触方式由点点接触为主发展到以面面接触或边边接触为主，颗粒与颗粒之间在接触面处啮合的更紧密，形成比较稳定的结构，在宏观表现上，振冲后粉细砂土的相对密度和静力触探指标得到明显改善。

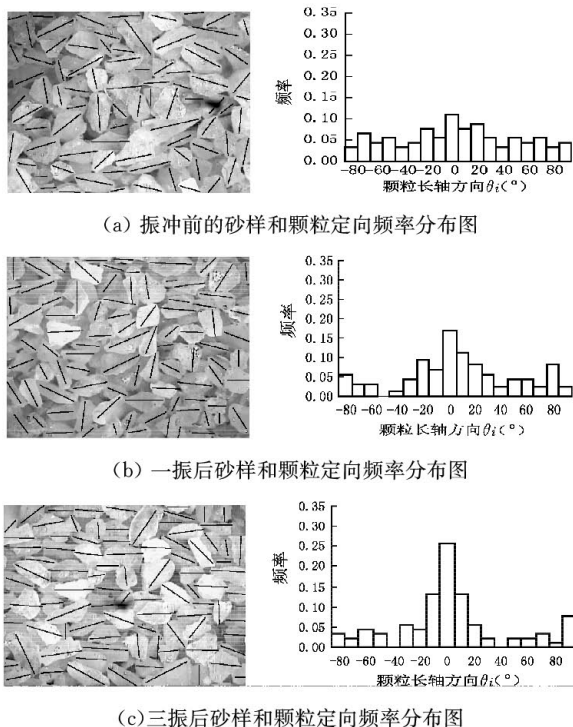


图2 不同振次后的砂样和颗粒定向频率分布图

(2) 根据人工砂的宏细观室内模型试验结果，砂土宏观密度和强度的改善除与颗粒之间孔隙减小有关外，还与颗粒的细观排列方向优化有一定程度的对应关系。由对颗粒细观排列的定量分析结果可知(图2)，经过两次以上的振冲加固后，砂

土颗粒沿水平方向呈现一定程度的定向性,颗粒排列的有序性得到明显的提高。颗粒排列的定向程度和有序性随离振点距离的增加呈现由低到高再由高到低的空间变化规律,与此相对应,粉细砂土密实度由振冲点向外的空间分布也表现为由低到高,再由高到低的发展趋势。颗粒排列定向程度的改善主要发生在前两次振冲过程中,当颗粒达到稳定状态后,继续振冲对颗粒排列影响很小。这从细观方面证实了对于特定的土体条件和振冲器性能,采用无填料振冲法加固粉细砂地基存在一界限密实度,当超过此界限值后无填料振冲法将失去效果。

2 低能量强夯联合真空井点降水法

2.1 技术介绍

传统强夯法的特点是能量高,连续夯击。在处理饱和和软土时必须对传统的强夯法的施工工艺进行改进,笔者根据含砂黏土的渗透性差、强度低的特点,通过现场试验,提出了低能量强夯联合真空井点降水法。该方法除了采用低能量强夯和少击多遍夯击外,还采用了以下施工工艺:①表层吹填一定厚度的吹填砂,形成排水通道,避免直接夯击黏土可能造成橡皮土现象;②布设真空降水井点管,加速超孔压的消散;③根据孔压消散的特性和黏土强度恢复情况,确定遍与遍之间的间歇时间。图3为外高桥港区四期工程采用低能量强夯联合真空井点降水法施工现场。



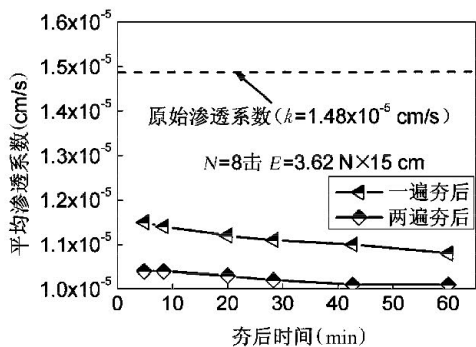
图3 外高桥港区四期工程施工现场

2.2 宏观机理研究

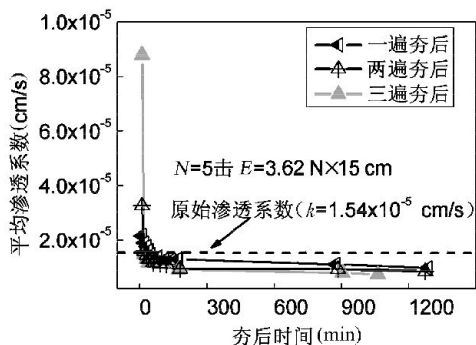
笔者认为强夯法施工工艺的选择与土体的渗透性有很大关系,目前国内外也未见土体冲击后的渗透性变化规律的相关文献,为了研究吹填土夯后的渗透性变化规律,通过制备不同细粒含量吹填土样,在自行改装的渗透仪内进行冲击荷载作用下的渗透性试验研究,考虑了细粒含量、冲击

能量、冲击遍数和夯后时间等4个因素对夯后吹填土样渗透性的影响,建立了不同细粒含量土体夯后其渗透系数随时间变化的预测公式。

图4(a)和(b)分别为细粒含量为20%和30%吹填土样在夯后渗透系数随时间的变化规律,当细粒含量为20%时,土样在冲击荷载作用后,土体的渗透性有较为明显的减少,夯后土样表现为瞬间被压密,呈现出纯净砂土的特征;当细粒含量为30%时,在冲击荷载作用下,其冲击后的渗透系数与细粒含量小于20%的有着明显不同的变化规律,冲击荷载作用后一段时间内其渗透系数比土样的原始渗透系数大,但经历一段时间后其渗透系数减小并小于原始渗透系数。这一变化过程表明在冲击荷载作用下土样中产生了树枝状微裂隙,由于微裂隙的产生改善了土体的渗透性,而后由于土体固结裂隙慢慢闭合又表现出渗透系数减小。图4(b)还表明细粒含量为30%的吹填土样在冲击后渗透系数峰值随遍数的增加依次升高,这是由于土体固结、触变恢复、强度提高的缘故,细粒含量为30%的吹填土样冲击后渗透试验结果证实了Menard饱和土体动力固结理论^[7]的合理性。



(a) 细粒含量 20%



(b) 细粒含量 30%

图4 吹填土夯后渗透系数变化曲线

2.3 微观机理分析

笔者通过对室内砂性土的模型试验,利用体式显微镜的跟踪摄像和图像处理技术,对夯锤正下方距离土体表面 $2D$ (D 为锤径) 处的砂颗粒进行跟踪和处理,得到不同击数下显微镜跟踪区域颗粒的排列情况。图 5 为拍摄到的砂颗粒微观照片。可以看出,随冲击次数的增加,1# 和 2# 标志点的竖向距离越来越小,1# 和 2# 标志点的长轴方向逐渐趋于水平方向,1# 和 2# 标志点从一开始的不接触变化到紧密接触。图 6 是通过 Geodip 软件^[8]处理后该区域颗粒定向性的玫瑰花图。图中表明该区域的颗粒由 132 个 ($n = 0$ 击) 增加到 150 个 ($n = 14$ 击),砂颗粒的长轴逐渐趋于水平。上述分析表明砂性土在冲击荷载作用下的细观加固机理是颗粒的排列从无序性排列到不断定向排列、颗粒与颗粒之间接触数不断增加、不断密实的

过程。砂颗粒越接近于定向排列,可用于水流通过的平均孔隙就越小,对应宏观上的表现为渗透系数减小,密实度增加;颗粒与颗粒之间接触数的不断增加,表明砂颗粒之间的接触点不断增加,砂颗粒骨架不断形成并密实,对应宏观上的表现为地基承载力的提高。

3 结 论

本文介绍和总结了两种大面积吹填土地基处理技术,并通过室内模型试验和现场试验的研究,对两种处理技术的宏观加固机理进行了初步研究和探索。研究表明:两种地基处理方法的细观加固机理均有颗粒不断定向排列、接触数不断增加和不断密实的过程。两种处理方法的发展过程表明地基处理新工艺和新方法的产生是一个不断摸索、不断完善、从失败中获取经验的过程,因此仍需要广大岩土工作者为地基处理新工艺、新方法的层出不穷而努力奋斗。

参 考 文 献

- [1] Mitchell J K. State of the art-soil improvement [C], Proc. 10th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1981,4:509~565.
- [2] 周健,曹宇,贾敏才,等. 无填料振冲法加固粉细砂地基试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1350~1355.
- [3] 周健,胡寅,等. 粉细砂的室内无填料振冲试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(5):790~794.
- [4] 郑颖人,陆新,李学志,等. 强夯加固软黏土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(1):18~22.
- [5] 周健,曹宇,贾敏才,等. 强夯-降水联合加固饱和软黏土地基试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(3):376~380.
- [6] Zhou Jian, Su Yan, Jia Min-cai, et al. In-site tests on vacuum dynamic consolidation to improve a hydraulic fill ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9):1091~1096.
- [7] Menard L, Broise Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. Geotechnique, 1975,25(1):3~18.
- [8] 周健,余荣传,贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2047~2052.

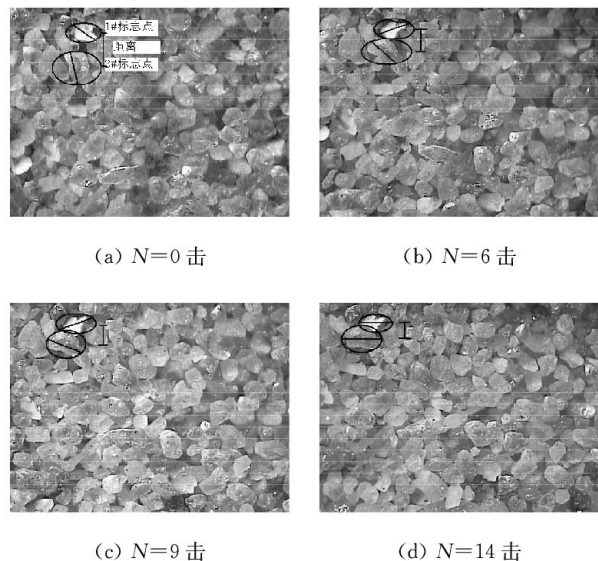


图 5 砂颗粒显微照片

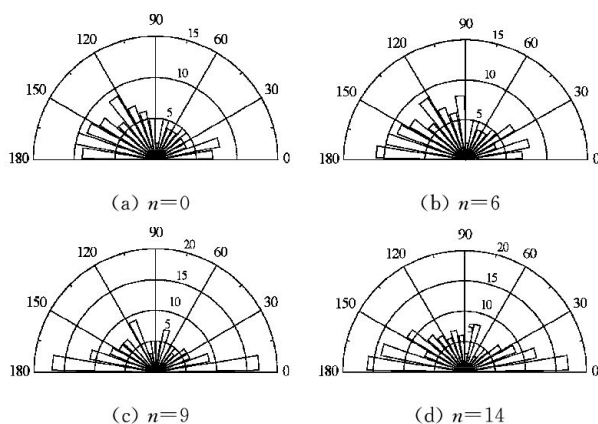


图 6 砂颗粒长轴定向演化玫瑰花图