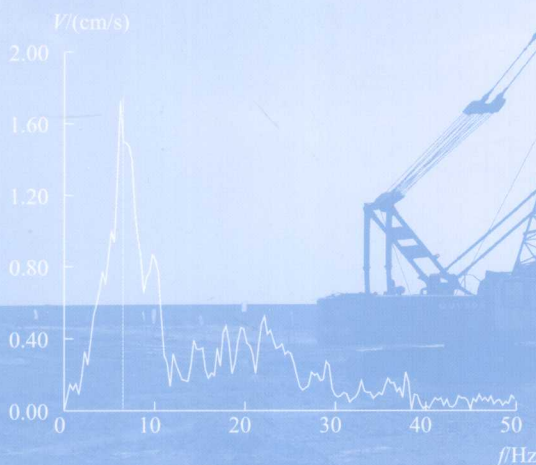


孙进忠 梁向前 著



DIJI QIANGHANG JIAGU ZHILIANG ANQUAN JIANCE
LILUN YU FANGFA

地基强夯加固质量安全监测 理论与方法



化学工业出版社

· 014013286

TU472.3
09

孙进忠 梁向前 著



DIJI QIANGHANG JIAGU ZHILIANG ANQUAN JIANCE
LILUN YU FANGFA

地基强夯加固质量安全监测 理论与方法

▶▶▶▶▶



TU472.3
09



化学工业出版社
· 北京 ·



北航

C1700552

382810310

本书依托南水北调中线工程漳古段湿陷性黄土渠基强夯加固工程,对地基强夯加固工程中的施工过程质量控制、加固效果检测以及强夯振动环境影响及安全评价几个环节中存在的技术问题展开研究。

本书主体分为三章:第1章对强夯施工过程中夯点土体加固状态实时振动监控的理论和 technical 问题进行了深入研究,建立了地基强夯加固状态的振动实时监控方法;第2章分析并解决了多道瞬态瑞雷波地基加固质量检测的几个关键技术问题,完善了地基强夯加固质量的多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法;第3章重点展开强夯振动特征研究,阐明了强夯振动环境影响监控和安全评价的方法。

本书可作为从事地基加固处理的工程技术人员的参考书,也可为相关专业研究生教学提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

地基强夯加固质量安全监测理论与方法 / 孙进忠,
梁向前著. —北京:化学工业出版社,2013.12
ISBN 978-7-122-19049-9

I. ①地… II. ①孙… ②梁… III. ①地基-强夯-
夯实加固-质量管理-安全管理 IV. ①TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 276556 号

责任编辑:袁海燕
责任校对:宋 夏

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京云浩印刷有限责任公司
710mm×1000mm 1/16 印张12 $\frac{3}{4}$ 字数255千字 2013年12月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:65.00 元

版权所有 违者必究

序

强夯法是地基加固处理工程中的重要工法之一。自从强夯法引入以来，我国工程界根据工程需要对强夯工法进行了不懈的探索，将强夯法从最初仅适用于砂土、碎石土这类非黏性土地基的加固方法，推广到杂填土、湿陷性黄土、非饱和黏性土乃至饱和黏土地基的加固，在工程中发挥了非常重要的作用，产生了巨大的技术经济效益。然而，地基强夯加固工程中仍然存在不少技术问题，成为强夯加固工法实施的障碍。

孙进忠教授及其团队针对地基强夯加固工程中的夯点土体加固状态实时监控、地基加固竣工质量检测和强夯振动的环境影响评价三个环节中存在的技术落后、评价标准不够明确等方面的问题，在深刻认识强夯现象的基础上，对相关科学问题展开研究，取得了一些创新性研究成果，建立了地基强夯加固状态的振动实时监控方法、地基强夯加固质量的多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法以及强夯振动环境影响的监控和安全评价方法三个技术体系，对提高地基强夯加固工程的技术经济效益具有良好的作用。

该书结合南水北调中线工程漳古段湿陷性黄土渠基强夯加固工程，展开相关问题的研究，介绍上述三个技术体系的相关理论和方法。

强夯工法的理论研究远远落后于工程实践，最根本的原因还是对强夯作用的物理力学过程认识不够。该书以冲击动力学的观点审视强夯作用的物理力学过程，明确描述了自夯锤接触地面、贯入土体到夯锤贯入运动停止这一过程中的强夯现象，系统提出了土体对夯锤动力响应的局部、近场、远场问题。这些认识，对于深化强夯理论研究，最终推动强夯工程的技术进步具有重要意义。

强夯振动影响一直是妨碍强夯工程实施的一个不利因素。该书站在波动力学的高度，从波场的视角认识强夯振动，不仅看到了强夯振动对环境影响的不利方面，也看到了强夯振动中蕴含着场地土体物理力学状态信息的有益方面，从而创造性地提出了利用强夯振动对强夯施工过程中夯点土体加固状态进行实时监控的思路，并完善了相关理论和方法，建立了夯点土体加固状态振动实时监控方法体系，成为可以替代夯沉量监控方法的新一代监控技术方法。

针对地基加固质量常规检测方法效率低、费用高，难以全面了解地基土体深部和横向加固效果，无法对大面积地基强夯加固质量进行连续跟踪检测的技术问题，该书展开了地基强夯加固质量的多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法研

究，在瞬态瑞雷波相速度提取和相速度与地基土体物理力学参数关系确定两个方面提出了新的认识。

在实测多道瞬态瑞雷波相速度提取分析中，提出了相邻检波道瑞雷波的时差对道间相位差影响的问题，突破了现有多道瞬态瑞雷波探测技术中的道间距上限，从而，用两个检波器就能完成以往由十几、二十几个检波器组成的检波器排列才能实现的相速度提取工作，大大提高了多道瞬态瑞雷波探测技术的效率。这不仅为实现地基强夯加固多道瞬态瑞雷波三维连续相速度成像奠定了基础，而且还为多道瞬态瑞雷波探测技术向高频探测领域拓展铺平了道路。

在场地土体瑞雷波相速度与土体物理力学参数相关性统计分析中，从瑞雷波相速度与地基土体深度的物理对应关系、地基土体表层扰动和地基土体对地基承载力贡献的有效范围以及地基土体采样测试操作的便捷性等方面考虑，首次提出了瑞雷波相速度反映的有效土层范围与土体物理力学参数测试取样点位置的合理对应深度。这一认识，解决了地基加固质量瞬态多道瑞雷波检测技术中由地基土体瑞雷波相速度成像到地基土体物理力学参数成像转换映射的技术关键，从而建立了地基强夯加固质量的多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法体系，为大面积地基强夯加固工程提供了高效率的加固质量检测技术。

对于强夯振动影响评价问题，该书按波动力学的观点对强夯振动现象进行了较深入的剖析，不仅对强夯振动的衰减规律进行了较深入的分析，更对强夯震源的能量辐射特征以及强夯振动的震相构成及其对不同夯检距上强夯振动的贡献进行了深入的研究。通过研究，证明了不同表达形式的强夯振动衰减公式在物理本质上的同一性，明确了强夯振动衰减规律的物理基础。同时，也指示了强夯振动中所蕴含的有关强夯震源和地基土体性质的信息，为强夯振动信息的提取利用指明了进一步的研究方向。另外，按照最不利原则，明确了强夯振动影响评价所应考虑强夯振动特征量，为强夯振动影响的评价提供了依据。书中提出了强夯振动影响范围评价和强夯振动建筑物安全性评价两种基本评价方法，建立了强夯振动环境影响的监控和安全评价方法体系，为强夯振动影响监控评价的工作布置和实施提供了依据。

总之，该书对强夯现象提出了较系统深入的认识，具有较强的创新性，对今后强夯的理论研究有一定推动作用，对强夯工程实践也有技术支撑作用，是近年来强夯研究领域一本不可多得的好书。

中国工程院院士

郑颖人

2013年10月

前言

强夯法自问世以来，在工程中得到广泛应用，已经成为地基工程中不可或缺的技术手段。然而，地基强夯加固工程仍然面临着系列妨碍强夯法工程应用的技术问题，反映了强夯理论研究落后于强夯工程实践的现状。

《地基强夯加固质量安全监测理论与方法》针对地基强夯加固工程中的施工过程质量控制、加固效果检测以及强夯振动环境影响及安全评价几个环节中存在的技术问题，依托南水北调中线工程漳古段渠道湿陷性黄土地基强夯加固工程展开研究，在剖析强夯现象的基础上，对有关科学问题进行了较深入的探讨，提出了一些新认识，解决了一些关键技术问题，建立了地基强夯加固状态的振动实时监控方法、地基强夯加固质量的多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法以及强夯振动环境影响的监控和安全评价方法三个技术体系，其中一些关键技术还申报了发明专利。这些研究成果为提高地基强夯加固处理中相关工程环节的效率 and 可靠性提供了技术支撑。

本书从冲击动力学的角度分析了锤土相互作用产生的强夯现象，从夯锤对土体的作用，锤土复合体的运动，到锤周地基土体对夯击的动力响应，剖析了强夯作用的物理过程，为强夯问题的理论研究提供了物理基础和认识论基础。从对强夯研究现状的认识和强夯科学问题的归纳，到对强夯问题的研究展望，关于强夯现象的这些认识成为贯穿全书的指导思想。

当前，地基强夯加固施工过程中的质量控制主要依赖对同一遍夯击中同一夯击点各次夯沉量的观测，以夯沉量减小到一定程度作为停锤的标准。强夯施工质量的这种过程控制方法效率低、测控参数与测控目标关系不确定、测控精度不稳定，甚至还存在安全隐患。地基强夯加固状态的振动实时监控方法研究的初衷就是为了克服当前强夯加固施工控制的这种技术落后的问题。振动实时监控方法研发的技术关键有两点：一是根据离开夯点一定距离之外测点上记录的振动时程推算夯点土体的振动特征；二是确定夯点土体加固状态参数与夯点土体振动特征参数的关系。本书第一章就是阐述对这两个技术关键问题所展开的研究。

地基加固质量常规检测方法效率低、费用高，难以全面了解地基土体深部和横向加固效果，无法对大面积地基强夯加固质量进行连续跟踪检测。地基强夯加固质量的多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法研发的目的就是要为地基强夯

加固质量检测提供更加高效可靠的检测技术。多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法的研究也有两个技术难点需要解决：其一，是现有多道瞬态瑞雷波探测方法本身在相速度提取原理上的缺陷；其二，是地基土体瑞雷波相速度与地基土体加固状态参数相关性分析中对比点的空间定位。在瑞雷波探测技术方面，尽管瑞雷波探测方法已经在工程勘察中取得了很好的应用效果，然而，现有多道瞬态瑞雷波探测技术在实测相速度提取原理上仍然存在一定缺陷，这使得瑞雷波方法在探测深度和浅层分辨率两个方面对测点间距的要求出现矛盾。为解决这个矛盾，实现同一测点上不同深度的探测目标，现有多道瞬态瑞雷波探测技术不得不采取多个检波器小道间距排列的观测方式。所以，现有多道瞬态瑞雷波探测技术在工作效率上难以满足大面积地基强夯加固质量连续检测的要求。地基土体瑞雷波相速度与土体加固状态参数之间的相关关系是将地基土体瑞雷波相速度成像转换为地基土体加固状态参数成像的桥梁，是地基强夯加固质量多道瞬态瑞雷波三维连续检测方法体系中的一个关键环节。在统计分析中，地基土体瑞雷波相速度与土体加固状态参数的数据对比样本（瑞雷波相速度和加固状态参数样本对）应该是地基中同一部位土体的代表值，这样才能建立起具有物理合理性的统计关系。然而，由于瑞雷波相速度与地基土体空间对应关系的特殊性，在以往的同类工作中这一基本问题并没有得以明确。本书第二章在阐明相关基础理论的基础上，较好地解决了这两个技术关键问题。

强夯振动对环境的影响是制约强夯工法应用的主要问题。强夯振动对环境的影响评价主要包括强夯振动特征（振动方式和振动强度）确定和振动影响程度（受振对象响应和承受能力）评判两个方面。目前，强夯振动特征与强夯震源作用方式之间关系的认识是相对薄弱的环节。现有研究和评价标准中，对强夯振动影响的监控和评价应主要关注的振动特征量（譬如，水平分量还是铅垂分量，频域峰值还是时域峰值）还不够明确。本书第三章对强夯振动研究和评价中这两个问题进行了较深入的研究，得出了较明晰的认识。书中将强夯振动影响评价分为两种情况：一是为控制强夯施工对环境影响的强夯振动影响范围评价；二是针对特定受振物的强夯振动安全评价。基于这种认识，归纳了这两种评价的具体工作方法，形成了强夯振动环境影响监控和安全评价的方法体系。

本书关于强夯问题的研究和认识反映了作者多年来在参与工程实践活动过程中对强夯问题的思索和感悟，书中关于强夯工程的三个方法体系的形成更是强夯工程需求推动的结果。南水北调中线工程“湿陷性黄土地基强夯加固实时监测与安全评价关键技术研究”项目研究激活了这些封存在已经发表的研究论文和多届研究生学位论文中的积淀，在项目研究过程中，对强夯现象的认识逐渐清晰，对强夯工程中技术关键问题的把握逐步明确，从而使本书得以呈现给读者。为此，作者特别感谢河北省水利工程局提供的科研合作机会，感谢河北

省水利工程局刘治峰教授级高级工程师、吕兴波高级工程师及南水北调中线工程漳古段 SG3 标项目部对项目研究的鼎力支持和帮助。感谢国家科技支撑计划(2012BAH10B01) 的资助。

书中关于地基强夯加固施工过程中夯点土体加固状态振动实时监控的内容,是研究生李高的硕士学位论文选题,地基强夯加固状态的振动实时监控方法中的一些重要思路的形成和关键问题的解决,都得益于导师和学生对相关问题的沟通和讨论,也离不开学生对论文研究工作的热情投入。

本书由孙进忠、梁向前执笔,全书由孙进忠统稿。

李高、熊峰、葛晓斐参加了部分章节的撰写和数据处理,郝明盛、邵安阳、肖庭庭、陈美玲、刘宏磊等做了大量的编务工作,在此一并表示感谢!

本书的研究工作得到了郑颖人院士的肯定,并欣然为本书作序。作者对郑颖人院士的支持致以由衷的敬意和感谢!

强夯理论研究远落后于强夯工程实践,本书关于强夯现象和强夯问题的一些思考和认识也只不过是抛砖引玉,强夯研究仍然任重而道远。由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2013 年 9 月

»»» 目 录

绪论	1
0.1 强夯法简介	1
0.2 地基强夯加固工程面临的主要问题	5
0.3 研究内容和依托项目	8
0.4 研究目标	10
参考文献	10
1 夯点土体加固状态实时监控	15
1.1 地基强夯加固质量实时监控方法的技术现状	15
1.2 地基强夯加固质量的评价标准	15
1.2.1 地基强夯加固质量的压实度标准	16
1.2.2 地基强夯加固质量的湿陷性标准	16
1.3 夯点土体强夯加固状态实时振动监控方法理论研究	18
1.3.1 夯锤对夯点土体的动力作用	18
1.3.2 强夯振动的传播规律	19
1.3.3 强夯振动的频域分析	21
1.3.4 夯点土体振动参数与土体加固状态之间关系的理论基础	24
1.4 夯点土体强夯加固状态实时振动监控的工程实验	27
1.4.1 强夯试验设计	27
1.4.2 强夯振动观测	30
1.4.3 夯点土体振动时程反演	39
1.4.4 夯点土体加固状态与振动特征之间的定量关系	52
1.4.5 夯点地基土体强夯加固状态实时振动监控的标准	55
1.5 夯点土体加固状态实时振动监控的实施步骤	57
1.5.1 试夯阶段的监测	57
1.5.2 施工阶段的监控	58
本章小结	58
参考文献	59

2	地基强夯加固质量的三维连续检测	61
2.1	地基强夯加固质量检测评价方法技术现状	61
2.1.1	地基加固质量检测的常规方法	61
2.1.2	地基加固质量检测的弹性波方法	61
2.2	瑞雷波探测的理论	62
2.2.1	瑞雷波频散特征的正演	62
2.2.2	瑞雷波实测频散曲线的提取	71
2.2.3	瑞雷波实测频散曲线的解释	75
2.3	地基强夯加固效果的物理模拟实验研究	77
2.3.1	模型设计及实验装置	78
2.3.2	实验模拟	82
2.3.3	实验结果分析	83
2.3.4	地基强夯加固物理模拟实验的结论	89
2.4	地基强夯加固质量的多道瞬态瑞雷波 CT 检测	89
2.4.1	多道瞬态瑞雷波观测系统	90
2.4.2	现场瑞雷波探测	91
2.4.3	地基土体多道瞬态瑞雷波 CT 相速度成像	92
2.4.4	地基土体压实系数与瑞雷波相速度的关系	98
2.4.5	地基土体压实系数三维分布和地基强夯加固效果	100
	本章小结	104
	参考文献	106
3	强夯振动对环境影响的监测与评价	107
3.1	强夯振动效应研究现状	107
3.1.1	强夯振动特征研究	107
3.1.2	强夯振动影响研究	108
3.1.3	强夯振动影响评价的方法	109
3.2	强夯振动及其衰减规律的研究	109
3.2.1	强夯震源的辐射特征与强夯振动方式	110
3.2.2	强夯振动衰减的量纲分析	113
3.2.3	强夯振动的震相分析	115
3.2.4	强夯振动的频率特征	119
3.3	南水北调中线漳古段渠基强夯试验振动监测	120
3.3.1	试验区概况	120
3.3.2	强夯振动观测设备及测线布置	122

3.3.3 强夯试验振动测试结果	124
3.3.4 强夯振动衰减及振动影响分析	148
3.4 漳古段渠基强夯施工建筑物振动安全监测评价	166
3.4.1 台口村民房强夯振动安全监测	166
3.4.2 大油村民房振动安全监测	174
3.4.3 建筑物强夯振动安全评价	182
本章小结.....	183
参考文献.....	184
4 方法创新与研究展望	187
4.1 方法创新	187
4.2 应用前景	190
4.3 研究展望	190

绪论

0.1 强夯法简介

(1) 强夯法应用概况

强夯法, 英文名为 dynamic compaction 或 dynamic consolidation, 即动力压实或动力固结。最早由法国工程师梅纳于 1969 年首创, 并在 1975 年通过文献详细介绍了强夯法^[1]。具体做法是 8~30t (约 80~300kN) 的夯锤, 起吊到 6~40m 高的空中, 然后让其自由落下产生巨大的冲击能量冲击地面, 在土体中产生巨大的应力波, 土体被压缩, 使地基土体强度提高、压缩性降低, 从而达到提高地基的承载力、降低使用期间建筑物沉降的目的。

强夯法施工方法简单易行, 加固效果好, 节约材料, 适用范围广, 费用较低, 且除了强夯时的振动对周围的建筑物可能产生影响外, 其对环境几乎没有任何污染, 因而在全世界很快得到了应用^[2]。强夯法最早应用于工程是在对 Riviera 滨海填土地基的加固中。自 1979 年潘千里^[3]介绍了强夯技术后, 在 20 世纪 70 年代末我国最早由交通部一航局针对强夯法在天津新港对软土地基进行了加固试验研究, 随后强夯法在全国范围内得到了推广。迄今为止, 强夯法从最初加固砂土、碎石土这类非黏性土推广到非饱和黏性土、杂填土、湿陷性黄土中。但在一些饱和软土, 如淤泥、泥炭土的应用中, 强夯法的效果还不太理想, 因而对于软黏土, 一般教科书或工程标准中都有明确规定不宜采用或不能采用^[4], 但如果与垂直排水、堆载预压相结合, 也可取得一定的效果。强夯置换法对解决上述情况提供了较好的办法^[5]。现在, 强夯法在我国仓库、油罐、码头、机场、工民建等地基处理过程中发挥了重要作用^[6~10]。

(2) 地基强夯加固施工方法

地基强夯加固施工的基本方法是利用重锤自由下落的高能量冲击作用改变地基土体的原有结构状态, 达到提高地基工程特性的目的。

不同类型的地基土体在高能量冲击作用下的结构重组的物理力学过程有显著差别, 控制地基土体结构重组过程的主要因素是土体的透水(气)性能和含水状态, 其中土体透水性能尤为重要。在强烈的冲击作用下, 地基土体中即刻产生强烈的动

应力,并以应力波的形式由锤土接触面向土体中迅速扩散,使得一定范围内的地基土体在非常短的时间内陆续受到强烈的压缩。在这种强烈的冲击压力作用下,透水(气)性好的土体(主要是粗粒土体)可以很快地排出孔隙中的液体(或气体),从而固体颗粒间孔隙的结构重组过程(孔隙体积减小,固体颗粒排列加密)也可以较顺利地完成,这类土体的强夯加固机理可归纳为“动力压实”(dynamic compaction);透水性差的细粒饱和土体在强夯作用下,土体的强夯加固效果主要取决于孔隙中流体的排出程度,这类土体的强夯加固过程称为“动力固结”(dynamic consolidation)更为恰当^[11,12]。透水(气)性差的土体(主要是细粒土体)在短时间内无法排除孔隙中的液体,由于液体(气体)的不可压缩性,孔隙体积就无法显著减小,固体颗粒的结构重组也难以进行,随着夯击次数增加,孔隙压力不断上升,土体固结程度不仅无法提高,反而还会形成所谓的“橡皮土”,从而无法达到地基压实加固的效果。工程实践表明,不采取排水措施的常规强夯法处理碎石土、砂土、黏性土、填土等地基,能够增加土体的密实程度和强度,也能够提高饱和砂土的抗液化性能、降低土体的湿陷性;而对饱和度高的黏性土,尤其是淤泥质土,则难以取得理想的加固效果^[13]。

经过工程实践的探索,逐步形成了针对不同类型地基土体的强夯施工工法。

常规强夯工法,只需将重锤提到一定的高度,然后令其自由下落产生对地基土体的夯击能,夯锤对地基强烈的冲击作用使地基内出现强大的应力波,引起土体内土颗粒发生位移、孔隙比减小、密实度增加,使土体结构重新排列,从而达到加固地基的目的。这种简单的强夯工法,一般先用较大能量加固深层土体,再用较小能量加固浅层土体,对碎石土、砂土、粉土、非饱和的黏性土和人工填土等地基加固效果十分明显。但对于软塑、流塑状态的黏性土,以及饱和的淤泥、淤泥质土,由于土颗粒细和其空隙间饱含的水分不易排出而效果不明显,有时还适得其反。

针对高饱和度的软黏土地基在高速冲击瞬间排水不畅导致强夯加固失效的问题,工程实践中提出了低能级强夯、动力排水固结法、预排水动力固结法和强夯置换法等强夯法的衍生工法^[14]。

低能量强夯的原理为:激发土体孔压,并使土体产生微裂缝,但又不完全破坏土体结构强度,逐步排出土粒间的孔隙水和气体,从而达到加速固结的目的。夯击时遵循先轻后重、少击多遍的原则,从上至下,逐步加强,逐步加深,直至达到工程设计要求。低能级强夯法在施工工艺上与传统的强夯法不同,不强调先重后轻,贯入度控制等传统强夯工艺,不破坏地表原有硬壳层,在沿江沿海地下水位高的大面积松软地基处理工程中得到了推广应用。郑颖人等(1998)^[15]、颜斌和徐张建(2009)^[16]、王建(2010)^[17]等先后对低能量强夯法进行过研究。

动力排水固结法,也可称为被动排水动力固结法。在软黏土地基中设置竖向排水体系(砂桩、袋装砂井、塑料排水板等),表面铺设砂垫层,利用夯锤给地基土施加冲击荷载,在土体中形成超静孔隙水压力,并使水沿着设置在土体中的排水通道被动排出,从而引起土体快速固结,这就是动力排水固结法。丘建金等

(1995)^[18]、王发国等(1997)^[19]、郑颖人等(1998)^[15]、叶为民等(1998)^[20]、朱爱农等(1999)^[21]、张俊等(2004)^[22]、周红波等(2005)^[23]先后对动力排水固结法进行过研究和应用。

预排水动力固结法采用井点降水、真空预压等措施使饱和土体的水分尽量在强夯前排出,减小土体的饱和度,从而达到提高强夯效率、降低地基土体形成“橡皮土”风险的效果。预排水动力固结法在上海、长三角地区饱和软土和吹填土地基的试验及应用取得了很好的技术经济效益^[24~31]。

强夯置换法^[32],采用强夯施工工艺在软土地基中形成一定深度的夯坑,并在夯坑内回填高强度、低压缩性的置换材料,利用夯击能打入软土层中,在地基中形成结构密实、有较高承载力的置换体;置换体透水性远大于周围的土体,从而成为软土排水的良好通道,置换体被打入土体的过程中对周围土体产生挤压,土体因受到置换体的挤压而向置换体中排水;置换体形成后,再通过满夯桩间土,使之充分排水固结,从而形成复合地基,进一步改善软土地基的物理力学性能,提高地基承载力。水伟厚^[33]曾撰文讨论了强夯置换法的概念,并对置换墩的长度进行了实测研究。总之,强夯置换法通过四种效应——挤密桩效应、置换加密效应、排水效应和复合地基效应,使软土地基得到有效的加固^[34]。强夯置换法适用于淤泥、粉质土、沼泽地等软土地基以及湿陷性黄土地基的处理,具有设备简单、施工速度快、加固效果好、造价低、适合处理的土质类别多等优点,强夯置换法在我国沿海软土地基处理^[35,36],内陆河湖沉积软土^[37~39],甚至在地下水位较高的厚层素填土^[40]以及灰水库形成的高含水粉煤灰^[41]地基处理中得到研究推广和应用,取得了良好的技术经济效益。

与强夯置换法类似的一种强夯衍生工法是司炳文^[42]发明的孔内深层强夯法(down hole deep compaction,简称DDC技术)^[43~45]。DDC技术通过机具成孔(钻孔或冲孔,成孔直径约400mm),然后在孔内填入素土、灰土、建筑垃圾或其他材料,用20~60kN的异型重锤对孔内填料自下而上分层进行高动能、大压强、强挤密的孔内深层强夯作业,使孔内的填料沿竖向深层压密固结形成直径为550~600mm的桩体,同时对桩周土进行横向的强力挤密加固,从而提高土的密实度和抗剪强度,改善土的变形特性,达到加固地基的目的,适用于各种复杂地层的地基加固处理。DDC工法振动小、噪声低,同时还能消纳废弃的建筑垃圾和渣土,非常适合城市建设和危房改造工程中的地基处理工程。DDC工法在湿陷性黄土地基处理工程中得到了很好的应用效果^[46,47]。

上述强夯施工方法或强夯工法衍生的工法均已纳入相关规范中^[48~50]。

(3) 地基强夯加固质量评价

地基强夯加固质量的检测是保证地基处理目标实现的关键技术环节。

地基强夯加固质量检测的依据是地基强夯加固设计和相关地基处理规范的要求^[48,49],主要包括地基土体工程性质的改善和有效加固深度两个方面。

地基强夯加固的目的是确保地基能够满足建筑物基础对地基变形和承载力两方

面的要求，这也是地基土体工程性质改善的具体体现。地基土体加固变形控制指标主要有土体的压缩模量 E_s （或变形模量 E_0 ）；地基土体加固承载力方面的直接控制指标就是地基承载力 f_{ak} [49]。此外，对于特殊土体地基，譬如湿陷性黄土地基、砂土地基，加固处理的控制指标还有湿陷性系数 δ_s [51]、液化指数 I_{LE} 或临界标准贯入击数 N_{cr} [52]。

地基强夯加固质量的检测方法主要分为取样试验和原位测试两个方面。

地基取样试验强夯加固质量检测是在不同处理前后的地基土体的抽样点上采取地基土体原状土样进行土工试验，测定土体的工程性质指标，从而了解地基强夯加固的效果 [53,54]。用于评价强夯加固质量效果的室内实验指标有以下几种。

① 土体物理指标：工程上常用土体的干密度 ρ_d 或压实系数 λ_c 作为地基强夯加固质量的评价指标 [48,55]。

② 土体力学指标：压缩模量 E_s 、抗剪强度指标 c 、 φ 。

可用试验指标的绝对值或相对增量来评价地基强夯加固效果。另外，还可以将取样试验指标换算为地基变形和承载力指标，对地基加固效果进行评价。

地基原位检测强夯加固效果主要是通过不同的原位测试方法来确定地基土体的工程性质指标，试验方法主要有动力触探、标准贯入、静力触探、载荷试验和瑞雷波测试等 [56~58]。对于不同土类加固目的不同，其原位测试方法及评价指标也不尽相同。不同土类检测方法及评价指标汇总见表 0-1。

■表 0-1 不同类型地基土体检测方法及主要控制指标汇总

土类	加固目的	主要检测方法	控制指标
黄土	消除湿陷性,提高地基承载力	取样试验、静力触探、轻型动力触探、标贯试验、重型动力触探、载荷试验、瑞雷波测试	E_s 、 λ_c 、 p_s 、 q_c 、 N_{10} 、 N 、 $N_{63.5}$ 、 f_{ak} 、 E_0 、 V_R
黏性土、黏性素填土	改善地基的均匀性,提高地基承载力	取样试验、静力触探、标贯试验、重型动力触探、载荷试验、瑞雷波测试	E_s 、 λ_c 、 p_s 、 q_c 、 N 、 $N_{63.5}$ 、 f_{ak} 、 E_0 、 V_R
粉土、砂土	消除液化势,提高地基承载力	静力触探、标贯试验、重型动力触探、载荷试验、瑞雷波测试	p_s 、 q_c 、 N 、 $N_{63.5}$ 、 f_{ak} 、 E_0 、 V_R
碎石填土	改善地基的均匀性,提高地基承载力	重型或超重型动力触探、载荷试验、瑞雷波测试	$N_{63.5}$ 、 f_{ak} 、 E_0 、 V_R

表中控制指标符号的含义为： E_s —压缩系数； λ_c —压实系数； p_s —静力触探锥尖阻力； q_c —静力触探比贯入阻力； N_{10} —轻型动力触探（钎探）贯入击数； N —标准贯入击数； $N_{63.5}$ —重型动力触探贯入击数； f_{ak} —地基承载力特征值； E_0 —地基变形模量； V_R —瑞雷波相速度。

主要检测方法及评价指标在地基强夯加固质量评价中应用的简要情况如下：

① 动力触探试验和标准贯入试验是通过测得贯入击数 N 或 $N_{63.5}$ 的夯后值或者夯前夯后的增长值、增长率来评价夯后地基的密实程度、判断液化势，并结合经验确定地基的工程性质指标夯后值或夯前夯后增长值、增长率，由此评价加固效果是否达到设计要求或计算土性指标改善的百分比。

② 静力触探试验是根据锥尖阻力 p_s 、比贯入阻力 q_c 夯后值或夯前夯后增长

值、增长率来评价地基加固效果。也可由静探指标和经验关系来确定地基的工程性质指标夯后值或夯前夯后增长值、增长率来评价加固效果是否达到设计要求或计算土性指标改善的百分比,同时还可以用于评价地基的液化势,作为对标准贯入试验结果的对照。

③ 载荷试验在强夯地基效果检测中是根据 p_s-s 曲线确定变形模量和地基承载力,主要的评价指标是变形模量 E_0 和地基承载力 f_{ak} 夯后值及夯前夯后增长值、增长率。

④ 瑞雷波测试方法是一种新兴的岩土原位测试方法,利用其频散特征和传播速度与岩土物理力学性质的相关性,可以了解各土层的加固情况,也可以评价地基土加固的均匀性。早在 19 世纪末,英国物理学家 Rayleigh 就证明了瑞雷波的存在^[59]。20 世纪 70 年代, F. K. Chang 和 Ballard 曾利用瑞雷波频散特性^[60]来研究浅部地质构造。1984 年, Nazarian 和 Stokoe^[61]使用重锤作为振源产生瑞雷波,现场检测得到瑞雷波信号,通过频谱分析来测定土层波速获得成功。随后几十年,岩土工程界在将瑞雷波方法应用于岩土工程方面作出了努力^[62~65]。

0.2 地基强夯加固工程面临的主要问题

由于强夯法显著的技术经济优势,地基强夯加固处理在工程中得到了广泛的应用。然而,迄今为止,地基强夯加固工程仍然面临着一系列妨碍强夯法工程应用的问题,可以从工程实践和科学研究两个方面归纳和表述这些问题。

(1) 工程问题

尽管强夯地基处理方法已经得到了广泛应用,但是,在地基强夯加固处理工程的设计、施工和质量验收三个主要环节中都面临着一些有待解决的问题。

① 设计问题

迄今为止,地基强夯加固施工的主要参数(针对一定地基加固要求的夯击能、夯点夯击次数、夯点间距、夯击遍数、各夯击遍数时间间隔)仍然依赖经验和试夯,尚无可供相关地基处理加固规范所采纳的设计计算方法和依据^[26]。

② 施工问题

地基强夯加固施工过程存在两个主要问题:一是同一夯点夯击的停锤控制问题;二是强夯振动对环境的影响以及夯点附近建筑物振动安全问题和人员精神和身体健康问题。

关于停锤控制,目前相关规范采用的是夯沉量监控方法^[26]。在施工过程中对强夯地基处理质量的现场监控,基本上都是采用贯入度(夯沉量)指标,把最后两次夯击的夯沉量作为停夯的判断标准。采用这样的标准监控,现场操作需要在夯击过程中不断停锤,人员进入夯坑实施测量,一是影响强夯施工进度,二是控制指标测量误差也较大,不能充分保障地基强夯加固的效率和质量。

至于强夯振动环境影响和振动安全评价,更是目前妨碍强夯施工能否实施的主

要问题,具体体现为强夯振动对建筑物安全和人群身心健康的影响。目前,几乎还没有专门针对强夯振动对建筑物和人群身心健康影响的研究,工程实践中遇到强夯振动影响的纠纷,只能采用现有的其他振动评价标准^[27,28]。另外,由于对强夯振动特征及其对受振物影响的研究程度不够,在实际问题中,究竟采用哪种强夯振动特征参数(譬如,是采用水平振动分量,还是采用铅垂振动分量)参与评价仍然不够明确。

③ 质量验收检测问题

目前,工程中常采用的强夯加固质量检测手段有现场原位测试、取样测试等方法^[48,49],这些方法只能按一定的抽检率在选定的测点上进行检测,效率低,费用高,而且不能对场地进行连续全面的检测,从而可能会留下一定的质量隐患。特别是对于工期紧、面积大、要求高的大型地基处理工程,传统检测方法更会成为影响工程进度的重要因素之一。另外,常规检测方法也难以实现对强夯有效加固深度的检测。

可见,对于大面积地基强夯加固工程竣工质量验收检测而言,常规检测方法手段的效率和检测能力难以满足要求,突破常规,寻求更有效的检测技术方法,对于提高强夯加固工程的技术经济效益十分必要。

(2) 科学问题

地基强夯加固处理工程实际中面临的工程问题反映了对于地基强夯加固物理力学过程研究和认识的不足,体现了地基强夯加固工程实践领先于理论研究、相关技术研发投入落后于工程实际需求的现状^[66]。

地基强夯加固方法中的工程问题反映出的科学问题可归纳为三个方面:强夯作用机理问题、强夯振动波场问题和地基加固质量检测技术方法问题。

① 强夯作用机理

强夯作用机理主要是指地基土体在强夯冲击作用下发生的物理力学变化过程,从力学研究考虑,也应包括夯锤对地基土体的作用过程。

强夯施工时,夯锤自一定高度自由落下冲击地面、贯入地基土体,实现地基加固的工程目标。夯锤贯入土体的过程中发生了一系列复杂的锤土相互作用,地基土体对夯锤冲击作用产生一系列的动力响应,主要表现为夯点局部土体的结构重组、夯点附近土体的塑性变形和夯点外围远场土体中强夯振动的扩散传播。

关于强夯作用机理的认识不仅对强夯施工工艺的选择有指导作用,对强夯振动的震源过程和强夯振动作用方式和振动特征的研究也具有重要意义。

不同类型的土体强夯加固作用机理差别显著^[67]。迄今为止,对透水性好的粗粒土体,孔隙流体(水、气)很容易排除,以及透水性差的细粒非饱和土、饱和土等不同类型地基土体的强夯加固机理和加固效果已经有不少关注和研究^[2,15,68~74]。但是,真正针对锤土相互作用中物理、力学过程的研究还很少,从冲击动力学角度对不同类型地基土体的夯点局部、附近和外围土体强夯动力响应的研究程度还远远不够。目前关于强夯作用机理的认识还不足以为地基土体强夯加固工程实践中所面