

基础工程处理 与 检测实录

主 编: 张季超

副主编: 刘积长 向伟明 刘慧平

J I C H U G O N G C H E N G C H U L I Y U J I A N C E S H I L U

中国建材工业出版社

TU47
Z16

414110

基础工程处理与检测实录

主 编 张季超

副主编 刘积长 向伟明 刘慧平



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基础工程处理与检测实录/张季超等编著. -北京: 中国建材工业出版社, 1997
ISBN 7-80090-610-8

I. 基… II. 张… III. ①地基-基础(工程)-地基处理②地基-基础(工程)-地基处理-检测 IV. TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 03871 号

张季超 编 主

李基敏 副主编 孙树松 副主编

内 容 提 要

本书密切联系基础工程处理与检测技术这个近年来工程界所关注的热点问题而编写。全书共十章, 包括基础工程处理与基础工程检测两部分内容, 即强夯技术加固地基、爆扩挤密灰土桩应用实例、钻挖孔扩底灌注桩的应用研究、复合地基的设计与施工、其它地基处理措施、土工织物加筋土、基础工程静荷载试验、桩基动测试验研究、附加质量法检测复合地基、桩基检测“质量管理手册”样本。

本书收集了包括国家重点工程建设和超高层建筑物在内的数十项工程实例, 集各位作者近十年来所取得的科学研究成果、国家专利技术及工程经验于一体。全书内容翔实, 概念清晰, 叙述简明扼要, 工程实例丰富。

本书可供从事基础工程处理与检测工作的工程技术人员以及土木界从事科研、设计、施工、质检, 监理、勘测、管理以及高等学校有关师生在工作中参考使用。

基础工程处理与检测实录

* * *

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 35 字数: 840 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 65.00 元

ISBN 7-80090-610-8/TU·136

前 言

基础工程处理与检测技术是近十年来建筑工程界和岩土工程界广大科技人员所关注的热点问题之一。本书密切联系这一热点问题，结合一些专家学者近年来所取得的科学研究成果和国家专利技术，收集了包括国家重点建设工程及超高层建筑物在内的数十项工程实例。全书分为基础工程处理和基础工程检测两部分，内容包括强夯技术加固地基的研究与应用、爆扩挤密灰土桩的研究与应用、钻挖孔扩底灌注桩在地基处理中的应用研究，复合地基的设计与施工、其它地基处理措施、土工织物加筋土的研究与应用，基础工程静荷载试验研究与应用、桩基完整性与承载能力动测试验研究，采用附加质量法检测复合地基承载力和建筑工程桩基检测《质量管理手册》试用样本。本书可供从事基础工程处理与检测工作的技术人员以及从事科研、设计、施工、质检、监理、勘察及高等学校有关专业师生在工作中参考使用。

本书由来自华南建设学院西院，郑州工业大学，河南财经学院，黄河水利委员会勘测规划设计研究院、河南省建设厅，河南省建筑设计研究院，河南省机关事务管理局开封市建筑设计院，郑州市规划局，河南省基础工程公司，郑州市基础工程总公司，洛阳市基础工程公司，孟县电厂扩建指挥部，驻马店地区建筑工程公司，化工部基础工程研究检测中心，广州市华宇建设开发公司和广东省南海市环境工程公司等单位的数十名中高级工程技术人员共同编写。书中所收集的数十项工程实例，均经过各位作者从各自从事的实际工程中筛选而来，具有较为全面的代表性。在编写过程中力求内容精炼，基本概念清晰，文字叙述简明扼要，并保持原有工程总结或检测报告的原貌。

参加本书编写工作的人员有（按章节顺序排列）：第一章为张季超、薛仁定、刘尚波，吴义章；第二章为张季超、刘贞安，陈捷，刘积长；第三章为张季超、王志玲，刘晓明、赵磊，刘慧平，王俊林，张聚山，吴义章；第四章为张季超，吕爱军，张立功，周同和，刘积长，刘宜群；第五章为张季超，刘静，周同和，张立功，杜思义，刘积长；第六章为王俊林，王志玲，张季超；第七章为张季超，赵楠，王卫民，吴义章，李思堂，李民生，张印杰，靳中华，向伟明，刘宜群；第八章为张季超，甘瑞华，向伟明，陈天宇，李宝华，赵楠；第九章为李丕武；第十章为王晓惠，张季超。全书由张季超主编，刘积长，向伟明，刘慧平副主编。张季超，刘慧平，向伟明校审。

本书在编写过程中，限于我们的经验和水平，难免有不足之处，恳请各方面专家、学者和广大读者批评指正，并提宝贵意见。

张季超

一九九七年十二月二十八日
于广州，华南建设学院西院

目 录

第一章 强夯技术加固地基的研究与应用	1
第一节 概述	1
第二节 强夯技术的施工机具及施工工艺	1
第三节 强夯技术加固地基的机理研究	5
第四节 强夯技术加固地基的设计及试验研究	9
第五节 结论与建议	13
第六节 集作市热电厂工程及检测报告实录	14
第七节 解放军洛阳外国语学院主教学楼强夯技术处理及检测报告实录	42
第八节 首阳山电厂二期扩建工程徐家沟灰场强夯技术处理及试夯 区检测报告实录	77
第二章 爆扩挤密灰土桩在孟县电厂扩建工程中的应用	101
第一节 概述	101
第二节 爆扩挤密灰土桩的设计与施工要点	102
第三节 爆扩挤密灰土桩在孟县电厂扩建工程中应用的设计施工总结	104
第四节 孟县电厂扩建工程爆扩挤密灰土桩试验检测报告实录	107
第五节 孟县电厂扩建工程地基处理经济效益分析	114
第六节 孟县电厂湿陷性黄土地基处理经验总结	114
第三章 钻挖孔扩底灌注桩在地基处理中的应用研究	119
第一节 概述	119
第二节 钻挖孔扩底灌注桩的垂直承载性状试验研究	119
第三节 钻挖孔扩底灌注桩基础的设计和分析	130
第四节 钻挖孔扩底灌注桩基础的设计实例	137
第五节 挖孔扩底空腹桩在地基处理中的应用	141
第六节 安阳市体育馆人工挖孔扩底桩静载试验实录	145
第四章 复合地基的设计与施工	153
第一节 复合地基设计中几个问题的分析与选择	153
第二节 复合材料桩在地基处理中的应用和发展	160
第三节 刚性复合地基的设计与施工	163
第四节 深层搅拌桩复合地基设计资料	166
第五节 深层搅拌桩复合地基施工组织设计实录	168
第六节 高压喷射注浆法复合地基设计资料	176
第七节 高压旋喷桩复合地基在地基处理中的应用	177
第八节 粉喷桩法复合地基设计参考资料	182
第五章 其它地基处理措施实录	185
第一节 综合压浆法在复杂地基处理中的应用	185
第二节 采用引孔沉管灌注桩法处理中原乙烯工程地基实录	188
第三节 高强水泥土桩复合地基在高重建筑物地基处理中的应用	199
第四节 水泥土桩复合地基施工要点	217

第五节 永夏热电厂基础工程的施工与检测实录	227
第六章 土工织物加筋土的研究与应用	233
第一节 概述	233
第二节 土工织物抗拔试验分析研究	233
第三节 土——土工织物界面摩擦特性试验研究	237
第四节 土工织物拉伸试验研究	240
第五节 土工织物加筋土三轴试验研究	243
第六节 加筋粉土的剪切强度特性探讨	246
第七节 多层土工织物加筋土地基承载力计算方法探讨	251
第八节 加筋土坡的极限平衡设计方法	256
第九节 土工织物加筋土的工程应用实例	258
第七章 基础工程静荷载试验研究与应用	265
第一节 概述	265
第二节 单桩荷载试验中荷载传递机理的测试与分析	265
第三节 桩端及桩侧阻力测试与分析	287
第四节 超高层建筑桩基静载试验与机理分析	299
第五节 郑州金博大城桩基静载试验报告实录	304
第六节 东明黄河公路大桥桩基静载试验报告实录	347
第七节 茂名 30 万吨乙烯工程桩基工程检测实录	357
第八节 中原 14 万吨乙烯工程桩基检测工程实录	375
第九节 上海恒隆广场钻孔灌注桩的垂直承载性状试验研究	389
第十节 茂名 30 万吨乙烯工程页岩电厂非均匀地基承载力的确定	398
第十一节 郑州裕达国贸桩基静载试验报告实录	401
第十二节 水泥土桩复合地基质量检测与试验新方法研究	417
第八章 桩基完整性与承载能力动测试验工程实录	421
第一节 概述	424
第二节 上海罗氏制药有限公司厂房桩基高应变动测报告实录	424
第三节 上海石化股份有限公司芳烃厂 20 万吨/年裂解汽油加氢装置工程桩基高应 变动测报告实录	433
第四节 茂名 30 万吨乙烯工程合成橡胶成品库桩基低应变动测报告实录	444
第五节 郑州裕达国贸桩基高应变低应变声波透射法检测报告实录	448
第六节 反射波法动测原理及桩身阻抗变化测试的对比分析资料实录	457
第九章 采用“附加质量法”检测复合地基承载力	466
第一节 概述	466
第二节 理论依据及方法技术	467
第三节 工程检测实录	474
第四节 结语	504
第十章 建设工程桩基检测《质量管理手册》试用样本	505
第一节 基本情况概述	505
第二节 本桩基检测室职责及岗位责任制	512
第三节 各项规章制度	515
第四节 桩基现场检测	524
第五节 附录	525

附录一	桩基检测工作人员守则	525
附录二	桩基动测仪器校验方法	526
附录三	复合地基静载试验实施细则	526
附录四	桩基水平荷载试验实施细则	529
附录五	桩基垂直静载试验实施细则	532
附录六	桩基低应变动测实施细则	536
附录七	桩基高应变动测实施细则	544
附录八	关于公布《质量管理手册》的通知	550
附录九	关于保证桩基检测工作公正性的规定	550
附录十	关于保证“××桩基检测单位”公正性的声明	551
主要参考文献		552

第一章 强夯技术加固地基的研究与应用

第一节 概 述

在工程建设中,绝大多数建筑物都是建在土地上,采用重锤夯实土是最古老也是最简单的处理方法,在国内外一直沿用至今。随着经济的发展,建设项目越来越多,而且荷载越来越重,对地基的要求也越来越苛刻。在这种背景下,地基处理技术得到了发展,到本世纪60年代末,法国 Menard 技术公司首创一种地基加固方法,用 $8\text{t}\sim 30\text{t}$ 的重锤和 $8\text{m}\sim 20\text{m}$ 的落距,对地基施加很大的冲击能(一般为 $500\sim 800\text{kN}\cdot\text{m}$),使地基土受到加固处理,这种方法称之为强夯法。

强夯法开始使用时仅用于加固砂土和碎石土地基,经过20多年的发展与应用,它已适用于杂填土、碎石土、砂土、粘性土、湿陷性黄土等地基的施工。我国是80年代初引入此项技术,并应用于工程实践,在《地基基础工程施工与验收规范》(GBJ202-83)和《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91)中已将其引入规范条文。

目前用强夯技术加固地基的方法,已广泛应用于工业与民用建筑、仓库、油罐、贮仓、公路和铁路地基、飞机场跑道、码头及大型填海造地工程等。工程实践表明,强夯法具有施工简单、加固效果好、经济实用等优点,在某种程度上比机械的、化学的和其它力学的加固方法更为实用,经济和有效。

本章内容主要介绍了由郑州工业大学、洛阳市基础工程公司、中州大学、郑州基础工程总公司等单位自1991年开始到1996年完成的《强夯技术加固地基的开发研究与应用》课题。该课题已于1996年10月通过河南省科学技术委员会的技术鉴定,并获得1997年度河南省建设科技进步奖。其主要内容为针对中小型基础工程公司的情况,研制一套适合于中小型起重机(16t 以下履带式)进行大吨位能量($3500\text{kN}\cdot\text{m}$ 以下)的施工机具及施工工艺,并结合工程实际对强夯技术加固地基的机理进行研究。经过近5年的工作,已进行了焦作热电厂、洛阳外语学院、洛阳首阳山电厂等工程的实际施工,并完成了强夯技术施工机具及施工工艺,强夯技术加固地基的机理研究,强夯技术加固地基的设计与试验研究等课题的研究工作。

第二节 强夯技术的施工机具及施工工艺

一、强夯技术的施工机具

强夯法又称动力固结法,就是将大吨位重锤提升到一定高度,使其自由下落,按特定的工艺对地基进行强力夯实,以达到加固地基的新的施工方法。

强夯法加固地基一般采用 $30\text{t}\sim 80\text{t}$ 的重锤, $8\sim 20\text{m}$ 的落距,对土进行强力夯击,将机械能转化为势能,再变为动能一夯击能对土体作用。它靠很大的冲击能(一般为 $500\text{kN}\cdot\text{m}\sim 8000\text{kN}\cdot\text{m}$)使地基土中出现冲击波和很大的动应力,以提高土的强度,降低压缩性,改善土的振动液化条件,并能消除湿陷性黄土的湿陷性,提高土层的均匀度等。

强夯法首先由法国的 L. Menard 于 1969 年用于夯实滨海填土，我国于 80 年代初引入此项技术，并应用于工程实践。强夯法对于新建工程具有施工方法简单，施工周期短、地基处理效果好和可大量节约地基处理费用等优点，广泛应用于黄土、砂土、碎石土、粉土、素填土、杂填土的地基处理，可取得较大的经济和社会效益。

河南省西部存在着大量的黄土地基和其它宜采用强夯法处理的地基，为加速河南强夯技术的发展，节约工程地基处理投资，适应工程的需要，结合该省实际情况，开发出适合我国国情的强夯施工机具，即采用较小吨位的吊车（16t 以下）进行大吨位能量（最高已达 3500kN·m）的强夯施工设备，该机具主要由夯锤、起重机、门架、自动脱钩器、滑轮组等组成。

1. 夯锤

夯锤是强夯施工时必不可少的重要设备，由于夯锤直接夯击地面，从而达到强夯要求的效果。这就要求夯锤要底面平整，且能使夯锤夯击地面时均匀夯击，并有很大的重量，一次夯击能处理一定面积的地基，夯锤通常用钢制、铸铁制或外包钢板内浇砼制作，底面积 $3\text{m}^2\sim 6\text{m}^2$ 。夯锤的选择对施工工艺、起重机效率发挥以及最佳夯击能都有着重要关系。共制作了三种夯锤，分别重 10t、15t、20t，分别用外包钢板内浇砼、铸铁和钢制作，锤底面采用圆形，直径 $\phi: 2523\text{mm}$ ，底面积 $A=5\text{m}^2$ （如图 1-2-1 所示）。

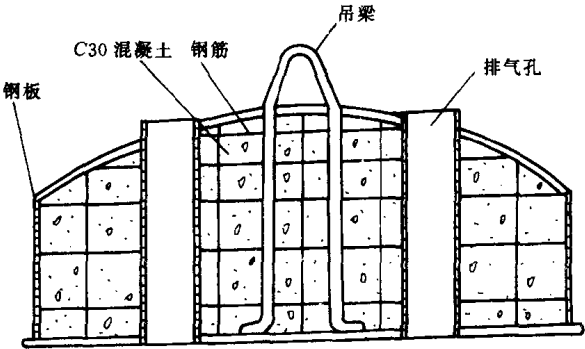


图 1-2-1 夯锤（砼制）

夯击作业时，由于夯坑对夯锤的进入有气垫作用，将消耗一定的夯击能量和对锤起拔有吸着作用，影响夯击效果，因此必须设置防堵通气孔，直径 $\phi 200$ ，对称布置 4~6 个，中心线与锤的轴线平行。通气孔结构如图 1-2-2 所示。当夯锤压缩夯坑气体时，空气经空心螺栓上的气孔排出，当锤体接触坑底时，空心螺栓头压缩弹簧并堵住气孔，阻止泥土进入，当起拔夯锤时，弹簧将螺栓推出、空气可由排气孔经螺栓中心孔自由流通。

2. 自动脱钩装置

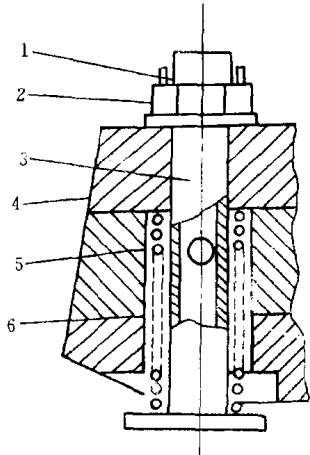


图 1-2-2 夯锤防堵气孔结构
1—开口销；2—螺帽；3—空心螺栓；4—锤重；5—弹簧；6—气孔

夯锤起吊到预定高度后，自由下落，夯击地面，完成一次强夯过程。为使夯锤自由脱钩安全方便，课题组设计出了自动脱钩器装置，如图 1-2-3 所示，其工作原理如图 1-2-4 所示。工作时将吊钩挂在夯锤提梁下，合上锁柄，提升时由于锁柄的限制将锤提起，其作用与普通吊钩相同。夯锤提升至预定高度时，利用固定在起重机上的定高度钢丝绳（拉绳）拉开锁柄，在夯锤重力作用下，吊钩绕轴转动，夯锤滑出吊钩，自由下落，吊钩复位，进行下一循环操作。

3. 起重机

强夯的工艺特点是将夯锤提升到一定的高度让其自由落下，对地基进行夯打击实，这就要求起重机具有大起重能力，稳定性能好，稳定方便，就位准确迅速。河南经常使用的是 16t 履带式起重机，该起重机适应场地能力强、移动方便，适合作为强夯时用的起重机。

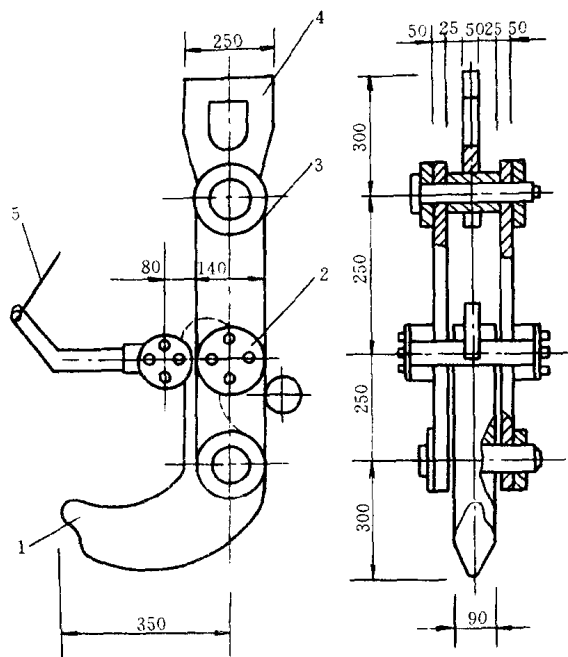


图 1-2-3 自动脱钩装置

1—吊钩；2—锁环轴轮；3—耳环；4—拉绳；5—锁柄

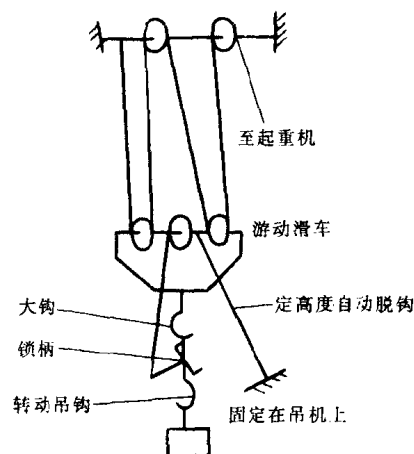


图 1-2-4 定高度
绳索脱钩原理

4. 工具式门架

强夯施工时，夯击能量很大，实际工程已达 $3500\text{kN} \cdot \text{m}$ ，采用 15t 夯锤则落距需要 23.5m ，若采用 20t 夯锤，落距需 17.5m 。由于起重机臂起重时倾角较大，夯锤脱落后由于突然卸载会引起起重臂突然产生后倾，严重时会发生倾覆现象，会危及人身及机械安全。即使不发生倾覆，由此引起的振动，对起重机产生的危害也很严重。因此必须使夯锤脱落时尽量少产生振动，增强其稳定性。为此，课题组采用了工具式门架的方法来处理这一难题。

门架如图 1-2-5 所示，由横梁和柱、柱脚组成，门架不仅要满足强度要求，且应满足稳定性要求，以保证门架在起吊过程中和夯锤脱钩后不发生失稳和扭转现象，由于门架较高，应采取一定的措施，降低柱的长细比，保证施工安全可靠。

(1) 横梁

门架横梁采用钢板焊接，可满足抗弯、抗剪要求。横梁示意图见图 1-2-6 所示：

(2) 门架柱

门架分节制作，分为标准柱和上、下两个特定柱。上柱上端通过螺栓和门架横梁连接，下柱下端支承于柱脚上。柱与柱之间用螺栓联接，柱脚水平放在地面上。柱均采用格构柱，四肢均用等边角钢，缀条采用等角边小角钢焊接，门架柱示意图如图 1-2-7：

标准柱每节 3m ，使用时可按起吊高度进行调节，并且自重较轻，运输安装均很方便。

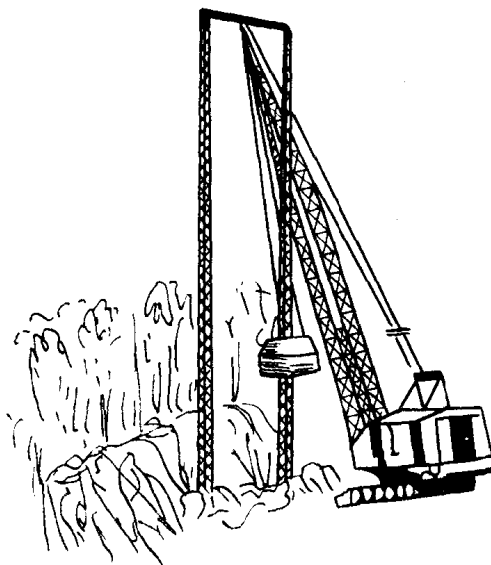
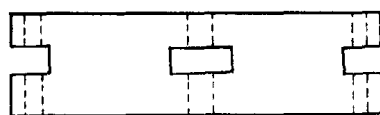
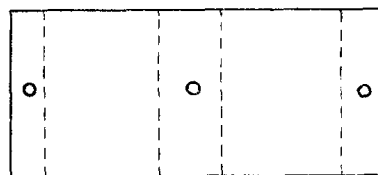


图 1-2-5

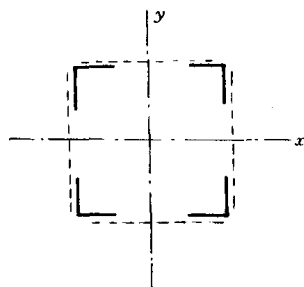


横梁平面图

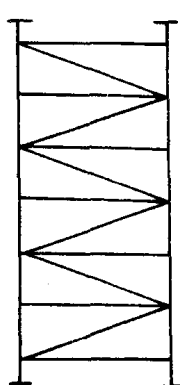


横梁立面图

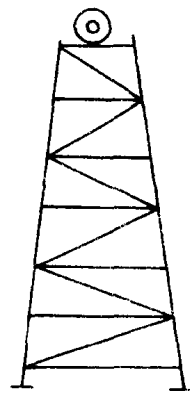
图 1-2-6



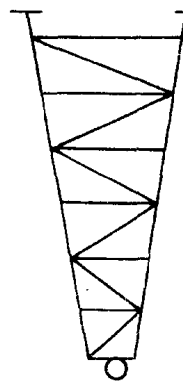
柱截面形状



标准柱



上柱



下柱

图 1-2-7

(3) 柱脚

柱脚如图 1-2-8 所示，采用铸铁制做。

采用这样的门架，可使施工过程中起重臂的稳定性加强，把振动降低到最小程度，使施工即安全又迅速。



图 1-2-8

5. 滑轮组

由于起重机起重能力较小，满负荷仅为 16t，为了达到所需的夯击能量，必须增加起重量，为了解决这个问题，课题组在门架的基础上，增设滑轮组，增加滑轮组后，可使其起吊能力达到 25t 以上。

课题组研制的这套施工设备，经过了洛阳外国语学院、首阳山电厂二期扩建工程等数项工程的实际检验，其稳定性好，就位准确，最大夯击能已达 3500kN·m。强夯处理地基达到了预期的效果，缩短了地基处理工期，节约了大量投资，取得了良好的经济效益和社会效益。

二、强夯技术的施工工艺

对采用上述施工机具的中小型施工队伍，由于施工时履带式起重机带有辅助门架，施工时的夯点布置可采用矩形或梅花形布点，在焦作热电厂、洛阳外国语学院和首阳山电厂二期扩建工程中的强夯一般分四遍进行。第一、二遍能级为高能量，隔行夯打，第一遍夯后原地整平，然后进行第二遍夯打，夯后原地整平，贯入度小于 70mm~100mm。第三遍能级为中能量，夯打第一、二遍夯过的夯点，夯打 6 击，贯入度小于 70mm。夯后原地整平。第四遍为满夯，低能量，挨点梅花形夯打，5 击，贯入度小于 50mm。挨点以夯锤直径为准，不得以扩孔边为准。夯后原地整平。

1. 强夯施工的步骤

(1) 清理并平整施工场地；

- (2) 标出第一遍夯点位置，并测量场地高程；
- (3) 起重机就位，使夯锤对准夯点位置；
- (4) 测量夯前锤顶高程；
- (5) 将夯锤起吊到预定高度，待夯锤脱钩自由下落后，放下吊钩，测量锤顶高程，若发现因坑底倾斜而造成夯锤歪斜时，应及时将坑底整平；
- (6) 重复步骤五，按设计规定的夯击次数及控制标准，完成一个夯点的夯击；
- (7) 重复步骤三至六，完成第一遍全部夯点的夯击；
- (8) 用推土机将夯坑填平，并测量场地高程；
- (9) 在规定的间隔时间后，按上述步骤逐次完成全部夯击遍数，最后用低能量能满夯，将场地表层松土夯实，并测量夯后场地高程。

2. 强夯施工应注意的事项

(1) 强夯施工前，应查明场地范围内的地下构筑物和各种地下管线的位置及标高等，并采取必要的措施，以免因强夯施工而造成损坏。

(2) 当强夯施工所产生的振动，对邻近建筑物或设备产生有害的影响时，应采取防振或隔振措施。

(3) 强夯施工前，组装起吊设备及辅助门式框架时，应特别注意起立机器的自身稳定性，当辅助门式框架过重时（如大于 $3000\text{kN} \cdot \text{m}$ 的能量时），这一问题犹如重要。

(4) 夯锤上通气孔，如遇堵塞，就立即开通。

(5) 夯时如表土过干（尤其满夯时）应采取加水等相应措施，增加含水量。

(6) 强夯时有土块、石子等飞击，现场人员必须戴安全帽。

3. 强夯施工过程中应有专人负责监测工作

监测内容有：

(1) 开夯前检查夯锤重和落距，以确保单击夯击能量符合设计要求；

(2) 在每遍夯击前，应对夯点放线进行复核，夯完后检查夯坑位置，发现偏差或漏夯应及时纠正；

(3) 按设计要求检查每个夯点的夯击次数和每击的夯沉量。

(4) 施工过程中应对各项参数及施工过程进行详细记录。

本课题组在首阳山二期扩建工程徐家沟灰场的强夯试验过程中，注意了对夯击次数和每击夯沉量的观测，并绘制了相应的曲线，由此得到了最佳夯击能。详见第六节首阳山电厂二期扩建工程徐家沟灰场强夯技术处理及试验区检测报告实录。

第三节 强夯技术加固地基的机理研究

强夯法自从由法国 Menard 技术公司创用后，经过二三十年的应用与发展，它已适用于加固从砾石到粘性土的多种地基土。由于它具有效果显著、设备简单、施工方便、适用范围广、经济易行和节省材料等优点，应用相当广泛。关于强夯法加固地基的机理，目前国内外的看法还不一致，但首先应该区分宏观机理和微观机理，其次对饱和土与非饱和土应该加以区分，而在饱和土中粘性土与无粘性土也应该加以区别。另外对特殊性土，如湿陷性黄土，应该考虑它的特殊性。同时，应该考虑强夯施工工艺，即单击夯击能量、单位面积平均夯击能、夯击数、夯击遍数等。本课题组结合焦作热电厂、洛阳外国语学院、首阳山电厂二期扩建工程

的两种介质引起不同的振动效应，两者的动应力差大于土颗粒的吸附能时，土颗粒周围的部分结合水从颗粒间析出，产生动力水聚结，形成排水通道，制造动力排水条件。

(2) 卸荷阶段 (AB 或 A'B')

夯击能卸去后，总的动应力瞬间即逝，然而土中孔隙水压力仍保持较高水平，此时孔隙水压力大于有效应力，因而将引起砂土、粉土的液化。在粘性土中，当孔隙水压力大于小主应力 σ_3 、静止侧压 $K_0\sigma_z$ 及土的抗拉强度之和时，即土中存在较大的负有效应力，土体开裂，渗透系数骤增，形成良好的排水通道。宏观上看，在夯击点周围产生了垂直破裂面，夯坑周围出现冒气冒水现象，这样孔隙水压力迅速下降。

(3) 动力固结阶段 (BC 或 B'C')

在卸荷之后，土体中保持一定的孔隙水压力，土体就在此压力下排水固结。砂土中，孔隙水压力可在大约 3~5 分钟内消散，使砂土进一步密实。在粘性土中孔隙水压力的消散则可能要延续 2~4 周，如果有条件排水，土颗粒进一步靠近，重新形成新的结合水膜和结构连接，土的强度恢复和提高，从而达到加固地基之目的。但是如果在加荷和卸载阶段所形成的最大孔隙水压力不能使土体开裂，也不能使土颗粒的水膜和毛细水析出，动荷载卸去后，孔隙水未能迅速排出，则孔隙水压力很大，土的结构被扰动破坏，又没有条件排水固结，土颗粒间的触变恢复又较慢，在这种条件下，不但不能使粘性土加固，反而使土扰动，降低了地基土的抗剪强度，增大土的压缩性，形成橡皮土。这样的教训也不乏其例，如在焦作热电厂由于工期所迫，在雨天实行强夯，表层土由于雨水而接近饱和，夯击能量为 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，结果形成橡皮土，未达到预期目的，地基承载力仅 70kPa 。因此对饱和粘性土进行强夯，应根据波在土中传播的特性，按照地质土的性质，选择适当的强夯能量，同时又要注意设置排水条件和触变恢复条件，才能使强夯法获得良好的加固效果。在施工前，事先必须进行试夯，探讨其规律，选择强夯能量和方法，检查能否产生动力排水固结和触变恢复。徐家沟灰场地基强夯处理经试夯最后选择 $2500\text{kN}\cdot\text{m}$ 的能量就是成功的例证。否则将不能取得良好效果，因此应持慎重态度。

3. 动力置换

对于透水性极低的饱和软土，强夯使土的结构破坏，但难以使孔隙水压力迅速消散，夯坑周围土体隆起，土的体积没明显减小，因而这种土的强夯效果不佳甚至会形成橡皮土。夯击能量大小和土的透水性高低，可能是影响饱和软土强夯加固效果的主要因素。有人认为可在土中设置袋装砂井等来改善土的透水性，然后进行强夯，此时机理应类似于动力固结。也可以采用动力置换。它分为整式置换和桩式置换。前者是采用强夯法将碎石整体挤入淤泥中，其作用机理类似于换土垫层；后者则是通过强夯将碎石填筑土体中，部分碎石桩（或墩）间隔地夯入软土中，形成桩式（或墩式）的碎石墩（或桩）。其作用机理类似于振冲法等形成的碎石桩，主要靠碎石内摩擦角和墩间土的侧限来维持桩体的平衡，并与墩间土起复合地基的作用。对橡皮土也可如此。焦作电厂强夯地基处理就是成功的例证。经碎石置换后，承载力可达 200kPa 以上。

三、强夯的时效理论

灵敏度较高的粘土的触变现象是众所周知的，实际上所有细颗粒的土都有触变现象，仅仅是程度不同而异。强夯后，土的结构被破坏，强度几乎降为零，随着孔隙水压的消散，土的抗剪强度和变形模量都有了很大提高（如图 1-3-2）。这是由于土颗粒间紧密接触以及新的结合水膜逐渐固定的原因。即使在一般孔隙水压力完全消散后，土的抗剪强度也会提高。有

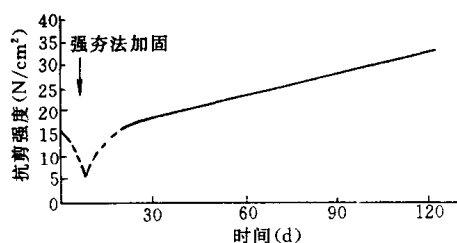


图 1-3-2 强夯后地基土抗剪强度的增长与时间的关系

资料表明, 夯击后的 6 个月所测的土的抗剪强度比一个月时增长 20%~30%, 而变形模量增长 30%~80%, 因此, 结合水逐渐固定的过程可能会延续几个月。而在此触变恢复期间, 土的变形(沉降)却是很小。有资料认为在 1‰ 以下。所以考虑到强夯的时间效应, 质量检验工作最好在夯后一个月后进行。不然得出的指标会偏小。例如, 洛阳外国语学院教学楼强夯工程东原来浸水试夯区, 由于测试时间与试夯结束时间间隔仅 7 天, 地

基承载力则明显偏低。

四、实验结果分析及影响加固效果的因素

课题组曾对洛阳外国语学院教学楼、焦作电厂、首阳山电厂二期工程等强夯前后进行静荷载试验, 静力触探, 动力标贯和竖井土工试验, 通过对比, 发现土的干密度、抗剪强度指标, 压缩模量, 地基承载力都有了很大提高, 而压缩系数明显降低。对湿陷性黄土, 同时可消除较深范围内的湿陷性, 加固效果显著。同时我们认为在强夯前应加强试夯工作。分析强夯加固的规律, 对选择适宜的施工参数意义重大。通过分析, 影响加固效果的因素有下述几种:

1. 夯击能量是影响加固效果的关键

要提高加固效果和有效影响深度, 首先要提高单击夯击能量。例如首阳山电厂二期扩建工程徐家沟灰场一试验区 (1800kN·m), 二、三试验区 (2500kN·m), 前者有效影响深度 4.0m, 而后者在 5.0m~6.0m 以上。再者, 提高单位面积平均夯击能在一定程度上可以提高加固效果。但加固效果并不与加固能量成级数增长, 即存在最佳夯击能。理论上讲, 在最佳夯击能作用下, 地基中出现的孔隙水压力达到土的自重应力。对粘性土, 由于孔隙水压力消散慢, 当夯击能逐渐增大时, 孔隙水压力也相应进行叠加, 因而可用其孔隙水压力的叠加值来确定最佳夯击能。但对砂性土, 由于孔隙水压力的增长及消散过程仅几分钟的时间, 因此, 孔隙水压力不能随夯击能增加而叠加。当孔隙水压力增量随着夯击数逐渐趋于恒定时, 可认为这种砂土所能接受的能量已达到饱和状态, 此时即为最佳夯击能。

2. 土层的性质及分布情况

上层土质好而下层土质松软, 或中间有硬土层, 夯击能往往被土质好的土层所吸收, 而影响软弱土层的加固。

3. 影响强夯效果的因素

土的含水量及饱和度, 在很大程度上影响着强夯的效果。根据洛阳外国语学院教学楼的试夯表明, 饱和度 S_r 在 63%~88% 之间时含水量适中, 试夯效果明显, 而 $S_r < 42\%$ 时夯实效果较差, 如饱和度过大, 也将影响夯击效果, 对粘性土甚至可能会形成橡皮土。

4. 施工方案的确定

应根据具体条件和所要达到的目的来确定施工方案。其中选择夯点数量及布置、间距、夯击遍数和各遍的施工时间间隔等施工技术参数是关键。而综合反映这些问题的指标可用单位面积平均夯击能 E_3 来表示:

$$E_3 = N \cdot n \cdot \frac{E_1}{A} \quad (1)$$

式中 A ——整个场地强夯加固面积；
 N ——夯击遍数；
 n ——每遍夯击所有夯点的总夯击次数；
 E_1 ——单击夯击能量。

根据实测资料，在选定 E_1 时，适当增加 E_3 ，在一定程度上可以提高加固效果。例如首阳山电厂二期扩建工程徐家沟灰场，三试区 $E_3=3.56\text{MJ/m}^2$ ，加固效果明显好于其他各区，有效影响深度达 7.0m。

第四节 强夯技术加固地基的设计及试验研究

一、前言

强夯法亦称动力固结法。就是将大吨位重锤提升到一定高度，使其自由下落。按特定的工艺对地基进行强力夯实。以达到加固地基的新施工方法。

强夯法加固地基一般是以 80~300kN 的重锤，8~20m 的落距，对土进行强力夯击，其特点是将机械能转换为势能。再变为动能——夯击能对土体作用。它靠很大的冲击能（500~8000kN·m）使地基土中出现冲击波和很大的动应力，以提高土的强度，降低其压缩性，改善土的振动液化条件，消除湿陷性黄土的湿陷性等，并能提高土层的均匀程度。

强夯法首先由法国的 L. Menard 于 1969 年用于夯实滨海填土，由于方法简单，快速和经济，在地基处理中得到广泛应用。实践证明：强夯不仅适用于碎石土、砂土、低饱和度的粘性土、填土等地基的加固，对消除湿陷性黄土的湿陷性及提高土的强度，也有显著的效果。

二、设计方法

采用强夯技术进行地基处理，一定要根据工程的地质条件和使用要求来确定，并合理正确地选择各种参数，才能达到有效而经济的目的。设计中经常遇到下列问题：锤重和落距，最佳夯击能，夯击遍数，两次夯击遍数的间歇时间、加固范围和夯点布置等内容。

1. 锤重和落距

通常根据试验选择的最佳夯击能来确定锤重和落距。在条件不许可时，可按 Menard 修正公式，根据起重机的起吊能力和要求加固的深度，按下式进行计算

$$H = \alpha \sqrt{w \cdot h / 10} \quad (1-4-1)$$

式中 H ：加固深度（m）；

w ：锤重（kN）；

h ：落距（m）。

α ：修正系数。对湿陷性黄土可取 0.35~0.5，焦作热电厂、首阳山电厂二期扩建工程表明：取 $\alpha=0.4$ 较为合理。

亦可采用下表 1-1 估算强夯的有效加固深度。

强夯法的有效加固深度（m）

表 1-1

单击夯击能 (kN·m)	碎石土、砂土等	粉土、粘性土、 湿陷性黄土等	单击夯击能 (kN·m)	碎石土、砂土等	粉土、粘性土、 湿陷性黄土等
1000	5.0~6.0	4.0~5.0	4000	8.0~9.0	7.0~8.0
2000	6.0~7.0	5.0~6.0	5000	9.0~9.5	8.0~8.5
3000	7.0~8.0	6.0~7.0	6000	9.5~10.0	8.5~9.0

注：强夯法的有效加固深度应从起夯面算起。

2. 最佳夯击能

在某一夯击能作用下,地基中出现的孔隙水压力达到土的覆盖压力时的夯击能称为最佳夯击能。

被加固地基土中孔隙水压力消散慢,当夯击能逐渐增大时,孔隙水压力亦相应的迭加,可据此迭加值确定最佳夯击能。必须指出,孔隙水压力沿深度的分布规律是上大下小,而土的自重压力是上小下大,因此,对被加固的地基土的最佳夯击能应根据有效影响深度确定为宜。在一般情况下,对于粗颗粒土可取 $1000 \sim 3000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^2$,细颗粒土可取 $1500 \sim 4000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^2$ 。

3. 每遍的最佳夯击数和夯击遍数

选择每遍的最佳夯击数,可根据静力触探、动力标贯及土工试验结果给出夯击数与有效影响深度的关系曲线,在满足有效加固深度的条件下,一般以曲线上明显变化的起点所对应的夯击数为每遍的最佳夯击数,且应同时满足下列条件。

- (1) 最后两击的平均夯沉量不大于 50 mm ,当单击夯击能量较大时不大于 100 mm ;
- (2) 夯坑周围地面不应发生过大的隆起;
- (3) 不因夯坑过深而发生起锤困难。

夯击遍数应根据地基土的性质确定,一般情况下,可采用 $2 \sim 4$ 遍,最后再以低能量满夯一遍。对于渗透性弱的细颗粒土,必要时夯击遍数可适当增加。且宜采用多遍数,少击数的施工方案。

4. 间歇时间

两遍夯击之间应有一定的时间间隔。间隔时间取决于土中超静孔隙水压力的消散时间。当缺少实测资料时,可根据地基土的渗透性确定,对于渗透性较差的粘性土地基的间隔时间,应不少于 $3 \sim 4$ 周;对于渗透性好的地基可连续夯击。

5. 加固范围

强夯的加固范围应大于建筑物基础的范围,否则会出现四周为外部没有夯击过和内部已夯击过的边缘。为了避免在夯击后的土中出现不均匀的“边界”现象,从而引起建筑物的差异沉降,必须规定对夯击面积增加一个附加值,放大宽度可自建筑物基础外侧边线起增加加固深度的 $1/3 \sim 1/2$ 距离,并不宜小于 3 m 。亦可按照下列公式进行计算。

$$A = \left(B + \frac{2}{3}h \right) \left(L + \frac{2}{3}h \right) \quad (1-4-2)$$

式中 A ——夯击范围 (m^2);

B 、 L ——分别为加固区的宽度和长度 (m);

h ——设计加固深度 (m)。

6. 夯点布置

夯点位置可根据建筑物结构类型布置,一般采用正三角形、正方形或梅花形布点。对大面积基础,宜采用正方形插档法布置;对条形基础可采用点线插档法布置;柱基可采用点夯法夯击;对砂土和抛石强夯挤淤,可用排夯法加固(锤印彼此搭接 $200 \text{ mm} \sim 300 \text{ mm}$);当要求加固深度较大时,可在较低标高上夯完后,再将土填到设计标高,进行第二次夯击。具体布置方法,可见图 1-4-1 所示。