

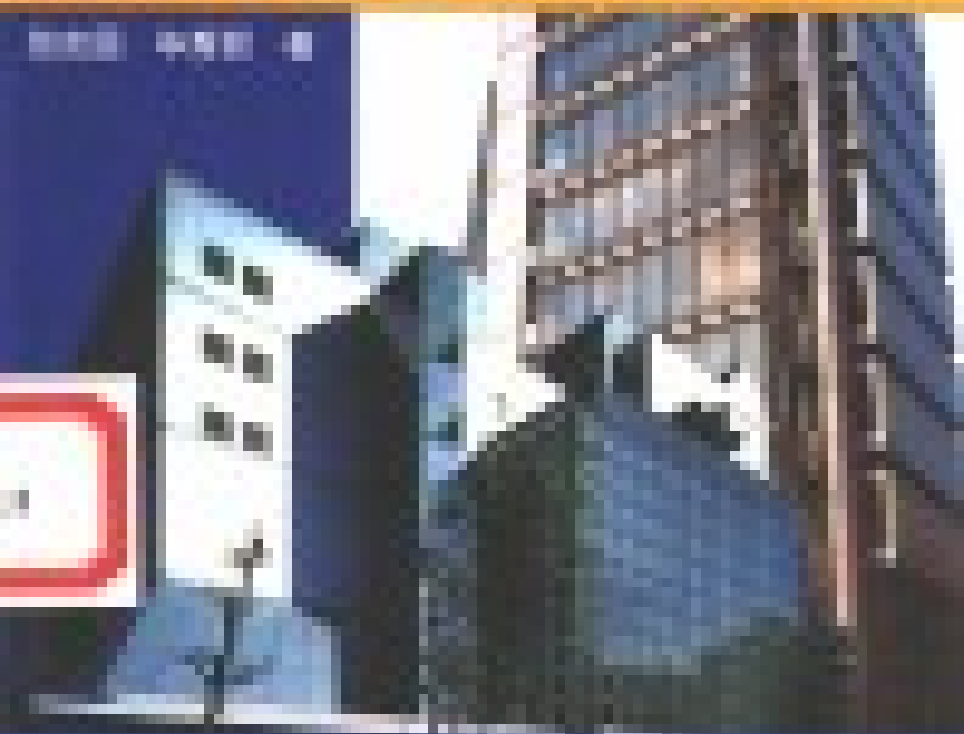
强夯法 加固机理与应用

张庆国 毕秀丽 著

2.3

强夯法 加固机理与应用

陈永贵 李海明 著



中国水利水电出版社 CHINA WATER & ELECTRICITY PRESS

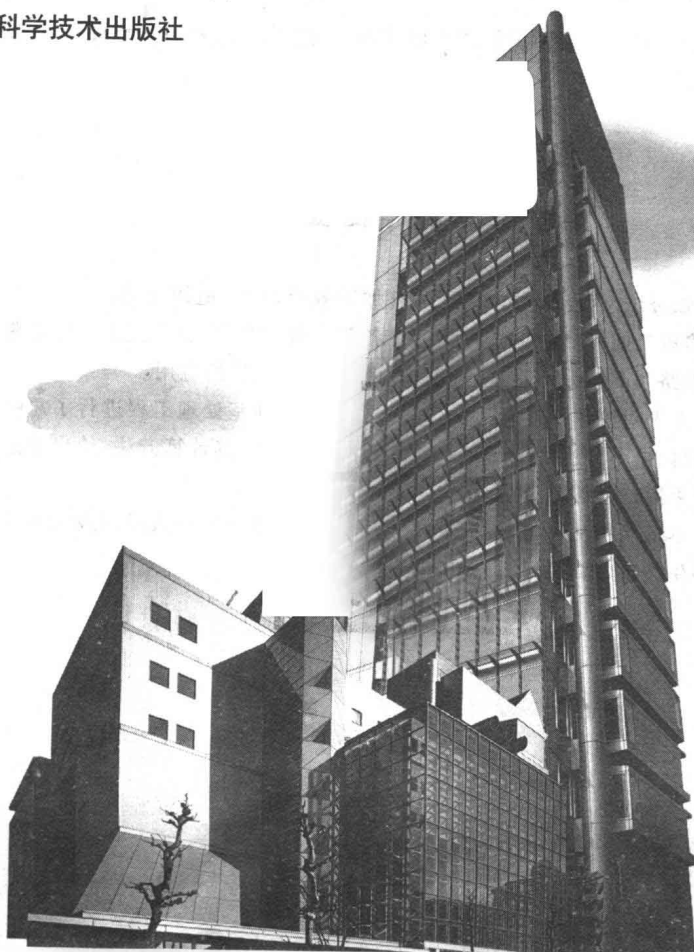
704)2.3
W293

强夯法

加固机理与应用

张庆国 毕秀丽 著

山东科学技术出版社



强夯法加固机理与应用

张庆国 毕秀丽 著

出版者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531) 2065109

网址: www.lkj.com.cn

电子邮件: sdkj@jn-public.sd.cninfo.net

发行者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531) 2020432

印刷者: 山东旅科印务有限公司

地址: 济南市九曲路中段 8 号

邮编: 250022 电话: (0531) 2724814

开本: 787mm × 1092mm 1/32

印张: 6.25

字数: 125 千

版次: 2003 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 7 - 5331 - 3338 - 2

TU·134

定价: 9.00 元

图书在版编目(CIP)数据

强夯法加固机理与应用/张庆国,毕秀丽著. — 济南:
山东科学技术出版社, 2003
ISBN 7-5331-3338-2

I. 强… II. ①张… ②毕… III. 夯实加固—基本知识 IV. TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 108381 号

内 容 提 要

强夯法又称动力加固法,具有加固效果显著、适用土类广、施工方便、缩短工期、节省费用等优点,在各类工业与民用建筑、仓库、机场跑道、铁路和高速公路路基等工程已得到迅速、广泛的应用。

本书对前人和作者亲自参与的多处强夯地基处理工程进行了总结和探讨,按不同土类分别研究了强夯加固机理及其计算方法,给出了适用于不同地基的强夯施工参数。

本书可供从事地基处理的设计、施工、科研及管理人员以及大专院校师生阅读、参考。

作者简介

张庆国 男,1964年11月生人。山东滕州人,现就职于山东黄河工程局。毕业于河海大学水利水电工程建筑专业,获工学士学位。1985年至1990年从事水利工程、引黄供水工程勘测设计工作;1990年至1992年从事山东黄河防洪工程规划工作;自1993年以来,主要从事各类工程施工管理工作。作为主要负责人先后参加了山东莱芜发电厂2号灰场加高工程、山东莱城电厂黑山沟贮灰场坝基强夯工程、山东莱城电厂厂区强夯工程、天津大港油田沙井子行洪道防洪工程、济南飞机场跑道强夯工程、山东博兴热电厂厂区强夯工程、济南市城市供水鹤山调蓄水库工程等大型项目的施工管理工作。

毕秀丽 女,1963年11月生人。山东荣成人,高级工程师。1985年毕业于河海大学水利水电工程建筑专业,先后就职于山东黄河勘测设计研究院、山东黄河河务局,多年从事水利工程、黄河防洪工程的设计、规划、科研工作,具有较丰富的理论知识和实践经验。近几年发表有关设计、施工方面的专业论文多篇。

前 言

强夯法,国际上又称动力固结法或动力压实法。这种方法是反复将很重的锤提到一定的高度然后使其自由落下,给地基以冲击和振动能量,从而提高地基的强度并降低其压缩性,改善地基性能。目前使用的夯锤重一般为 $10 \sim 40\text{t}$,提升高度大约在 $10 \sim 40\text{m}$ 。强夯法在工程实践中具有加固效果显著、适用土类广、设备简单、施工方便、节省劳力、施工期短、节约材料、施工文明和施工费用低等优点,目前已有几十个国家、成千上万项工程采用此法处理地基。

强夯法处理地基是 20 世纪 60 年代末由法国 Menard 技术公司创用的。第一个工程是用于处理滨海填土地基,该场地表层为新近填筑的约 9m 厚的碎石填土,其下是 12m 厚疏松的沙质粉土。场地上要求建造 20 栋 8 层居住建筑。由于碎石填土是新近填筑的,如采用桩基,负摩擦力将占单桩承载力的 $60\% \sim 70\%$,十分不经济。经研究采用堆载预压法处理地基,堆载历时 3 个月,堆土高度 5m ,只沉降 200mm 。最终改用强夯法处理,单位夯击能为 $1200\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}^2$,只夯击一遍,整个场地平均夯沉量达 500mm 。建造的 8 层居住建筑竣工后,其平均沉降仅为 13mm 。

我国于 1978 年开始,先后在天津新港、河北廊坊、山西白羊墅、河北秦皇岛等地进行强夯法试验研究和工程施工,取得了较好的加固效果,随后强夯法迅速在全国各地推广应用。

强夯法适用于处理碎石土、沙土、粉土、黏性土、杂填土和素填土等地基。经过处理后的地基,既提高了地基土的强度,又降低其压缩性,同时还能改善其抗震动液化的能力和消除土的湿陷性。这种处理方法还常用于处理可液化沙土地基和湿陷性黄土地基等。

20世纪70年代中期,我国采用强夯法处理填海地基获得成功,并在沿海地区推广应用,为我国广大沿海地区进行大规模“填海造地”工程提供了经济有效的地基处理方法和经验,具有重大的经济效益和社会效益。

采用强夯法处理工业废渣,其效果也是理想的。工程实践证明,将质地坚硬、性能稳定和无侵蚀性的工业废渣作为地基或填料,采用强夯法处理能取得较好的效果,从而解决了长期存在的废渣占地和环境污染等问题,同时还为废渣利用开辟了新的途径。

目前,应用强夯法处理的工程范围很广,有各类工业与民用建筑、仓库、油罐、贮仓、飞机场跑道、铁路和公路路基及码头堆场等。总之,强夯法在某种程度上比其他处理方法应用更为广泛、更为有效和更为经济,已成为我国最常用的地基处理方法之一。

1991年强夯法纳入国家现行的《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91),从而使强夯法的设计和施工有章可循,并为强夯法的进一步推广应用和强夯技术的发展创造了有利条件。

目前,强夯法加固地基的理论尚未完善,在具体应用中尚有若干问题,应引起注意或有待于进一步研究。强夯法的设计需要对强夯的机理有比较明确的认识。关于强夯法加固地

基的机理,目前国内外的看法还不一致。其主要原因是各类地基土的性质差别很大,很难建立适用于各类土的强夯加固理论,有必要按不同土类分别研究强夯机理及其相应的设计计算方法。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,而在饱和土中黏性土与无黏性土也应该加以区别。

目 录

第一章 强夯加固机理.....	1
第一节 强夯加固的一般机理.....	1
第二节 强夯加固的时效特征.....	5
第三节 强夯加固数值模拟中的锤 - 土接触时间 计算.....	6
第二章 强夯加固与工程实例	10
第一节 饱和粉性土的强夯加固	10
第二节 沙漠地基的强夯加固	19
第三节 填土地基的强夯加固	23
第四节 软土地基的强夯加固	50
第三章 强夯置换法的加固实例	63
第一节 强夯块石墩加固软弱地基	63
第二节 强夯置换碎石桩法	71
第三节 填石强夯法加固软弱地基	79
第四章 强夯试验研究实例(一)	86
第一节 工程概况与试验目的	86
第二节 强夯试验概况	87
第三节 强夯加固效果分析	98
第四节 强夯施工参数的试验研究	121
第五章 强夯试验研究实例(二)	125
第一节 工程概况	125

第二节 强夯试验的目的和要求	126
第三节 强夯试验过程和夯期检测结果	131
第四节 强夯前后地基土特性	153
第六章 强夯法加固地基的结论与展望	182
主要参考文献	186

第一章 强夯加固机理

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,在饱和土中黏性土与无黏性土也应该加以区别。对特殊性土,如湿陷性黄土,应该考虑它的特殊性,还应考虑强夯施工工艺,即单击夯击能量、单位面积平均夯击能、夯击数、夯击遍数等实际施工中的问题。

第一节 强夯加固的一般机理

一、夯击能传递机理

由强夯产生的冲击波,按其在土中传播和对土作用的特性分为体波和面波。体波包括纵波(P波)和横波(S波),从夯击点沿着一个半球波阵面径向向地基深处传播,对地基土可起压缩和剪切作用,可能引起地基土的压密固结。面波(R波)从夯击点沿地表传播,其随距离的增加衰减比体波慢得多,对地基土不起加固作用,其竖向分量反而对表层土起松动作用。因此,强夯的结果,在地基中沿深度常形成性质不同的3个区:①地基表层形成松动区;②松动区下面某一深度,受到体波的作用,使土层产生沉降和土体的压密,形成加固区;

③加固区下面冲击波逐渐衰减,不足以使土产生塑性变形,对地基不起加固作用,称为弹性区。

二、强夯法的加固机理

强夯法加固地基的机理,从加固原理与作用看,分为动力夯实、动力固结、动力置换三种情况,其共同特点是,破坏土的天然结构,达到新的稳定状态。

1. 动力夯实

在非饱和土,特别是孔隙多、颗粒粗大的土中,高能量的夯击对土的作用不同于机械碾压、振动压实和重锤夯实。巨大的夯击能量产生的冲击波和动应力在土中传播,使颗粒破碎或使颗粒产生瞬间的相对运动,从而孔隙中气泡迅速排出或压缩,孔隙体积减少,形成较密实的结构。实际工程表明,在冲击动能作用下,地面立即产生沉降,一般夯击一遍后,夯坑深度可达 0.6~1.3m,夯坑底部形成一层超压密硬壳层,承载力比夯前提高 2~3 倍以上,在中等夯击能量 1 000~3 000 kN·m 的作用下,主要产生冲切变形。加固范围内的气体体积将大大减少,从而使非饱和土变成饱和土,或者使土体的饱和度提高。

湿陷性黄土,性质比较特殊,其湿陷是由于其内部架空孔隙多、胶结强度差、遇水微结构强度迅速降低而突变失稳,造成孔隙崩塌引起附加的沉降。用强夯法处理湿陷性黄土破坏其结构,使微结构在遇水前崩塌,减少其孔隙。

2. 动力固结

强夯法处理饱和黏性土时,巨大的冲击能量在土中产生很大的应力波,破坏土体原有的结构,使土体局部发生液化,产生许多裂隙,增加排水通道,使孔隙水顺利逸出,待超孔隙

水压力消散后,土体固结。由于软土的触变性,强度得以提高,这就是动力固结。

在强夯过程中,根据土体中的孔隙水压力、动应力和应变关系,加固区内波对土体的作用分为三个阶段。

(1)加载阶段 在夯击的瞬间,巨大的冲击波使地基土产生强烈振动和动应力。在波动影响带内,动应力和孔隙水压力往往大于孔隙水压力,有效动应力使土产生塑性变形,破坏土的结构。对沙土,迫使土的颗粒重新排列而密实。对饱和土应是动力夯实。对细颗粒土,法国 Menard 教授认为,大约 1%~4% 的气体(以气泡形式存在)体积压缩的同时,由于土体中的水和土颗粒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 夯击能卸去后,总的动应力瞬间即逝,而土中孔隙水压力仍保持较高的水平,此时孔隙水压力大于有效应力,将引起沙土、粉土的液化。在黏性土中,当孔隙水压力大于主应力、静止侧压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。从宏观上看,在夯击点周围产生垂直破裂面,夯坑周围出现冒气、冒水现象,孔隙水压力随之迅速下降。

(3)动力固结阶段 在卸荷之后,土体中保持一定的孔隙水压力,土体即在此压力下排水固结。在沙土中,孔隙水压力大约 3~5 分钟内消散,使沙土进一步密实。在黏性土中,孔隙水压力的消散可能要延续 2~4 周。如果有条件排水,土颗粒将进一步靠近,形成新的结合水膜和结构连接,土强度恢

复和提高,从而达到加固地基之目的。如果在加荷和卸载阶段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,不但不能使黏性土加固,反而使土层扰动,降低了地基土的抗剪强度,增大了土的压缩性,而形成橡皮土。这样的教训不乏其例,如建设焦作热电厂时,由于工期所迫,在雨天实行强夯,由于雨水,表层土接近饱和,夯击能量为 $3\,000\text{kN}\cdot\text{m}$,结果形成橡皮土,未达到预期目的,地基承载力仅为 70kPa 。因此,对饱和黏性土进行强夯,应根据波在土中传播的特性,按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。施工前,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,经试夯后选择 $2\,500\text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能量便是成功例证。

3. 动力置换

对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,土的体积无明显减小,因而这种土的强夯效果不佳,甚至会形成橡皮土。单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,可在土中设置袋装沙井等来改善土的透水性,然后进行强夯。此时加固机理类似于动力固结,也可以采用动力置换。动力置换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淤,其作用机理类似于换土垫层;后者是通过强夯将碎石填筑土体中,形成桩式(或

墩式)的碎石墩(或桩),其作用机理类似碎石桩,主要靠碎石内摩擦角和墩间土的侧限来维持桩体平衡,并与墩间土共同作用。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,经碎石强夯法处理后,地基承载力达 200kPa 以上。

第二节 强夯加固的时效特征

灵敏度较高的黏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,仅仅是程度不同而已。强夯后,土的结构被破坏,强度几乎降为零,随着孔隙水水压力的消散,土的抗剪强度和变形模量都有很大的提高。这是由于土颗粒间紧密接触以及新的结合水膜逐渐固定。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。资料表明,夯击后 6 个月测得的土的抗剪强度比 1 个月时增长 20% ~ 30%,变形模量增长 30% ~ 50%,因此,结合水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。由于强夯的时间效应,质量检验应在夯后 1 个月后进行,否则得出的指标会偏小。例如,洛阳外国语学院教学楼强夯工程东区浸水试夯区,由于测试时间与试夯结束时间间隔仅 7 天,测试出的地基承载力明显低于实际情况。

第三节 强夯加固数值模拟中的 锤 - 土接触时间计算

对强夯时地基的动力反应分析,接触面应力确定是必须的边界条件。在理论计算中,一般假设接触面应力沿锤底均布、随时间呈三角形或正弦分布。因此,接触面应力确定需计算接触面应力峰值和接触时间。

一、接触时间计算公式

许多学者进行了接触时间的计算研究。R.Scott 等(1975)、P.W.Mayne 等(1983)、赵维炳等(1986, 1987)、孔令伟等(1998)、刘惠珊(1996)分别依据不同的原理、从不同的途径提出了可用于估算接触时间的计算公式。

R.Scott 等用集总参数法,将锤 - 土视为一维质点 - 弹簧 - 黏壶,得出接触时间

$$t = \frac{\frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \frac{R \cdot \bar{\omega}}{S}}{\omega} \quad (1)$$

式中, R 为阻尼常数, ω 为角频率。

赵维炳等对 Scott 公式修正为

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{M}{S}} + \frac{1}{\omega'} \tan^{-1} \sqrt{\frac{4M \cdot S}{R^2} - 1} \quad (2)$$

式中, R' 、 $\bar{\omega}'$ 与 R 、 $\bar{\omega}$ 表达式相同,但用卸荷模量 E_r 代替加荷模量 E 。

P.W.Mayne 等(1983)视锤 - 土为弹 - 质体系,相互作用时间用自振周期之半来考虑,故