

公路改扩建旧路基 强夯加固技术

Dynamic Compaction Improvement
Technology of Old Road Embankment for
Rebuilding and Widening of Road

周勇 朱伟 崔新壮 郝学臣 等 编著



人民交通出版社

China Communications Press

公路改扩建旧路基强夯加固技术

周 勇 朱 伟 崔新壮 郝学臣 等 编著



人民交通出版社

内 容 提 要

本书以威海—乳山高速公路改建工程为例,系统阐述了旧路基的强夯利用技术,内容包括强夯加固机理与施工方法、旧路基利用中的关键技术、旧路基利用中工程资料的收集、旧路基利用引起的不均匀沉降分析、旧路基利用中强夯方案的确定、旧路基改建高速公路强夯施工、旧路基改建高速公路强夯质量检查、工后沉降监测、技术经济比较等。

本书可供从事公路改扩建的设计、施工和监理人员参考,同时也可作为铁路、水利、港口、机场等行业的相关专业技术人员提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

公路改扩建旧路基强夯加固技术/周勇等编著. —

北京:人民交通出版社,2010.11

ISBN 978-7-114-08784-4

I. ①公… II. ①周… III. ①道路工程—改造—路基—夯实加固 IV. ①U416

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 230678 号

书 名:公路改扩建旧路基强夯加固技术

著 者:周勇 朱伟 崔新社 郝学臣 等

责任编辑:刘永超 夏迎

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:12

字 数:203 千

版 次:2010年11月 第1版

印 次:2010年11月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08784-4

定 价:30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

公路改扩建旧路基强夯加固技术 编委会

主 编:周 勇 朱 伟 崔新壮 郝学臣
副 主 编:姚占勇 商庆森 乔国忠
吕国仁 郭长路
参编人员:孙建华 董琳琳 冯洪波
谭永乐 李振江 刘立新

前 言

近年来随着我国经济的快速发展,交通量的迅猛增长和大轴载车辆的增加使很多道路已经远远不能满足使用要求,将原有高速公路拓宽或将低等级公路改扩建成高等级公路成为一种趋势。公路改扩建一般不需要进行大规模的拆迁,不需要重新选线,且能够利用原有公路材料,节省大量的资源,并且工程造价低、工期短、征用土地少。

与原有高速公路的加宽相比,利用低等级公路路堤建设高等级公路技术难度更大,有三个关键问题需要解决:(1) 新旧地基和路基不均匀沉降问题;(2) 新旧路基密度不均匀问题(旧路基压实度不满足规范要求);(3) 新旧路基拼接处薄弱带的处理问题。旧路堤因为处理难度大,一般采用推翻后重新碾压的方案,但这样不仅不能完全解决以上问题,而且会导致工程成本提高,工期延长。“高速公路利用旧路基的关键技术研究”是山东省高速集团有限公司与山东大学、山东省交通规划设计院依托威海—乳山高速公路改建工程,共同开展的山东省交通科技项目。考虑到强夯法处理深度大、效率高、成本低的特点,项目组提出了高速公路利用旧路基的强夯技术,通过理论分析和试验研究,成功解决了以上技术问题,并在国内外首次提出了利用等级路旧路堤建设高速公路的成套技术。

本书以威海—乳山高速公路改建工程为例,系统阐述了旧路堤的强夯利用技术。内容涵盖了路堤强夯加固原理、施工技术及质量控制标准,新旧路基不均匀沉降计算方法、处置与沉降观测技术、旧路堤利用方案和工艺优化等。

全书由山东高速集团有限公司周勇、朱伟、郝学臣,山东大学崔新壮、姚占勇、商庆森,山东省交通规划设计院郭长路等合作编写。

本书在编写过程中引用了国内外许多专家学者的研究成果和文献,同时本书的编辑、出版和发行得到了人民交通出版社的大力支持,在此致以衷心的感谢。

由于编写时间紧且水平有限,错误之处在所难免,欢迎读者批评指正,以求改进。

编著者

2010年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 强夯加固机理与施工方法	5
2.1 强夯法概述	5
2.2 强夯加固机理	6
2.3 强夯处理方法的影响因素	19
2.4 强夯设计	23
2.5 强夯振动危害及评价指标	32
第 3 章 旧路基利用中的关键技术	39
3.1 不均匀沉降处理技术	39
3.2 新旧路基结合部拼接技术	43
3.3 新旧路基差异沉降控制标准研究	47
3.4 模型试验与有限元分析	51
第 4 章 旧路基利用中工程资料的收集	54
4.1 一般公路工程地质勘察	54
4.2 改建公路工程地质勘察	59
4.3 强夯法的岩土工程勘察	62
4.4 工程实例	62
第 5 章 旧路基利用引起的不均匀沉降分析	66
5.1 沉降理论	66
5.2 不均匀沉降计算与分析	75
5.3 不均匀沉降计算实测	85
第 6 章 强夯方案的确定	101
6.1 强夯引起的路堤不均匀性对路面弯沉的影响	101
6.2 地基强夯处理最优夯击数研究	109
6.3 路堤强夯处理参数研究	116

6.4 旧路基利用方案	127
第7章 强夯施工	129
7.1 强夯设备	129
7.2 施工方法与程序	131
7.3 工程实例	132
7.4 施工注意事项	135
第8章 强夯质量检验	137
8.1 现场质量检验	137
8.2 工程实例	139
第9章 强夯振动监控	149
9.1 试验场地及振动测试	149
9.2 试验结果及其分析	150
9.3 强夯振动控制	156
第10章 工后沉降监测	158
10.1 沉降监测方法	158
10.2 沉降分析	164
第11章 技术经济分析	167
11.1 经济比较	168
11.2 工期比较	172
11.3 综合比较	175
参考文献	177

第 1 章 绪 论

改革开放以来,我国的公路建设取得了举世瞩目的成就,到 2009 年底,全国公路总里程将达到 386 万公里,而高速公路建设更是异军突起,截至 2009 年底,我国的高速公路通车里程已达 6.5 万公里,其里程总数已跃居世界第二位。但是近年来随着我国经济的快速发展,交通量的迅猛增长和大轴载车辆的增加,原有的高速公路已经远远不能满足要求,原有高速公路的加宽以及将低等级道路改建成高速公路势在必行。这种筑路方式一般不需要进行大规模的拆迁,不需要重新选线,且能够利用原有公路材料,节省大量的资源,具有工程造价低、工期短、征用土地少等优点。

尽管目前我国高速公路改扩建工程量巨大,但是国内尚无具体的设计和施工技术规范。2004 年版《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)对路基拓宽改建做了一些规定,但基本上是原则性的一般规定,对高速公路拓宽改建只有简短的说明,该规范第 6.4.2 款规定:“拓宽路基压实度应符合本规范的规定,必要时,可采用冲击碾压或强夯等进行增强补压,以消减新旧路基拼接拓宽的差异变形。新旧路基的拼接处理设计,除符合本规范 6.3.4 规定外,当路堤高度超过 3m 时,可在新旧路基间横向铺设土工格栅,以提高路基的整体性。”

与新建高速公路相比,改扩建工程具有施工难度大、工艺复杂、质量要求高等技术特点。旧路堤的利用,有如下三个关键问题需要解决。

(1) 新旧地基路基不均匀沉降问题

在旧路堤自重载荷作用下,旧路堤下的地基经过多年的固结变形,沉降已基本结束,而新加宽侧地基则不然。不同高度旧路基上填筑不同高度的土层时,将出现新旧路基下地基的不均匀沉降及由其引发的路面纵向开裂的现象。

(2) 新旧路基密度不均匀问题

旧路堤的压实度受当时施工条件和压实标准的制约,低于现行高速公路路基压实标准,若旧路堤不经压实处理就加以利用,则旧路堤与新填筑的路堤会存在差异沉降变形。

(3) 新旧路基拼接处薄弱带的处理问题

新旧路堤拼接处既是压实不足的薄弱区,又是新旧路堤变形不均引起开裂的薄弱带。如何加强这一区域内新旧路基的结合,使得处理后的沉降差得以均匀过渡十分关键。

以上三类问题若处理不好,将直接影响路面结构的受力状态,导致路面产生沉降或纵向开裂,见图 1-1。



图 1-1 道路纵向裂缝

路面产生沉降或纵向裂缝的主要危害:一是影响了高速公路的通行安全。维修时至少需要封闭一幅车道,施工车辆和通行车辆之间经常发生刮擦和碰撞,十几公里甚至几十公里的高速公路交通大堵塞时有发生,驾乘人员苦不堪言。二是增加了养护费用。对道路进行养护时,需要将面层、基层和部分路基铣刨后,再按道路施工工序逐层施工、摊铺、碾压、养生。据不完全统计,全国每年用于处理高速公路纵向开裂的费用近百亿元。三是影响高速公路的通行能力。维修过程中,车速明显减慢,有时会减到 20km/h 以下,远远低于高速公路的行车速度,造成车辆堵塞、绕道等问题。

现在面临的现实是:科学研究在有的方面远远落后于高速公路建设及维修的需求。研究并解决好这些问题将具有重要的现实意义与工程价值,对以后类似的施工具有积极的借鉴作用,并可为行业规范的修订和完善提供依据。

强夯法也称动力固结法(Dynamic Consolidation),是由法国工程师 Menard 于 1969 年首创的一种地基加固方法。这种方法是反复将质量一般为 10~40t

(最大可达到 200t)的夯锤提升到一定高度(一般为 10~40m),使其自由下落,对地基土进行强力冲击,通过巨大冲击和振动能量,提高地基承载力并降低其压缩性,改善地基性能。强夯法具有效果显著、适用面广、设备简单、施工方便、节省劳动力、施工期短、节约材料和费用低廉等诸多优点。它不仅能提高地基土的强度、降低其压缩性,还能改善其抗振液化的能力和消除黄土地基的湿陷性,目前已在工业民用建筑、公路及铁道、机场跑道、码头堆场等地基加固工程中得到了成功运用。

“高速公路利用旧路基的关键技术研究”是山东省高速集团有限公司与山东大学、山东省交通规划设计院依托威海—乳山(以下简称威乳)高速公路改建工程,共同开展的山东省交通科技项目。威乳高速公路是国家重点公路威海—乌海线威海至青岛支线的重要组成部分,是山东省公路网主框架“五纵、四横、一环”之“一环”和威海市“三纵、三横”之“一纵”的重要路段。旧威海至乳山公路始建于 20 世纪 80 年代末期,1992 年全线通车,当时修建标准为二级汽车专用公路,路面设计宽度为 18m,路堤高度一般为 1~6m。威乳二级汽车专用公路起自环翠区江家寨立交桥,经草庙子东、文登西、南黄南、大孤山,在乳山市水井子村南与乳山—即墨(青岛)公路相连,路线全长 78.8km。路基路面方面基本符合二级公路要求,但在竣工报告中发现以下几项缺陷:个别填方路段宽度不够,边坡压实不充分、不稳定,高填土路段基底压实不足,有沉陷,部分挖方路段边坡不整齐;特别是乳山路段,据了解,当时工程施工主要压实机械为链轨车,且路基填筑时间仅为一个月,压实度受到影响。

威乳高速公路的线位大部分与旧威乳汽车专用路重合,如图 1-2 所示。老路基的土质较复杂,且施工时未经充分碾压,压实度较低。原设计方案将老路基全部清除后重新填筑碾压形成新路基。尽管这一方案可有效保证路基的施工质量,但会形成对旧路资源和土地资源的浪费,并且会增加路基土石方工程量,延长工期,增加工程造价。威乳高速公路的建设如何利用老路基,成为该项工程关键的技术问题之一。考虑到强夯法处理深度大、效率高、成本低的特点,项目组提出了高速公路利用旧路基的强夯成套技术,用强夯法来解决以上提到的三个关键问题。在对方案的可行性进行充分论证的基础上,开展了试验段研究。通

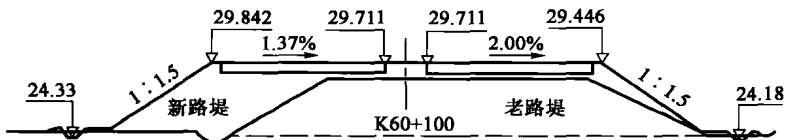


图 1-2 威乳路 K60+100 横断面图(尺寸单位:m,高程单位:m)

过该课题的研究,对高速公路建设利用旧路基关键技术进行了探索,并总结摸索出了一整套技术和规律。该技术已通过专家鉴定,专家组对该技术给予了较高的评价。工后道路运营两年的情况表明这套技术是成功的,没有出现任何问题,达到了高速公路的技术要求。

本书较系统地介绍了国内外旧路基利用技术。相对于技术比较成熟的旧路拓宽技术,利用等级路路基修建高速公路的工程实例很少,缺乏相关的成套技术,故本书以威乳路改建项目为例,详细介绍了旧路基利用的相关研究成果。

第2章 强夯加固机理与施工方法

2.1 强夯法概述

法国 Riviera 滨海填土地基加固工程是世界上第一例强夯法地基处理工程。一般认为强夯法是利用重锤在一定落距下对地基土施加巨大的冲击能,通过对土体结构的改变达到改善地基土的物理力学性质的深层地基处理方法。

强夯法具有加固效果显著、施工设备简单,施工方便迅速和工程造价低廉等优点,与其他地基处理方法不同,强夯法不消耗三材(钢材、水泥、木材),对周边环境不存在工后污染,基本不受地下水的影响,加固深度大,施工噪声较小,所以强夯法较其他机械的、化学的地基处理方法在许多方面更为有效和优越,夯击过程中可能对周边建筑物产生的振动影响是强夯法唯一显著缺点,因此要求强夯法施工应保持一定安全距离,故强夯法特别适合新开发的大面积的开阔场地的地基处理工程,如港口堆场、仓储码头、机场跑道场坪、道路路基和新建厂矿场地平整等。我国于1978年1月由原交通部第一航务工程局及其协作单位首次针对强夯法在天津新港三号公路进行了专门试验,随后强夯法在全国范围内得到了推广,如今已在全国十多个省市的近千项工程中得到了应用,取得了巨大的经济效益,同时也逐渐形成了一套适合我国国情、具有我国特色的强夯机械和施工工艺,使强夯法成为了我国主要地基处理技术之一。

强夯法作为一种深层地基处理方法,其最初的英文名称为 Dynamic Consolidation,即动力固结,以后根据加固工艺和加固机理的不同又发展出两个名称: Dynamic Compaction(动力压密)、Dynamic Replacement(动力置换)。强夯法不同于20世纪50年代前苏联所推荐的重锤夯实法(Heavy Tamping),后者指较为轻型的夯实,一般归为浅层地基处理方法类。两者之间的区别见表2-1。

强夯法与重锤夯实法的区别

表 2-1

地基处理方法	锤质量 $m(t)$	落距 $H(m)$	有效加固深度 $D(m)$	夯点间距 $d(m)$
强夯法	12~170	12~40	6~40	2~14
重锤夯实	≤ 12	≤ 12	≤ 6	2~3

Menard 最初首创强夯法时,强夯法适用地基土为砂土、碎石土这类非黏性土地基,现已推广应用到从块石土到黏性土的各类地基土中。在我国,强夯法广泛应用于碎石土、砂土、湿陷性黄土、非饱和粉土及黏性土,旨在提高地基土强度,降低地基土可压缩性,消除土的湿陷性、可液化性和提高地基土的均匀性。对杂填土、钢渣土、吹填砂和深厚回填块石土等成因、力学性质各异的特殊土采用强夯法同样取得了成功,强夯法还曾用于消除地基土的弱膨胀性。对于饱和黏性土,特别是淤泥、淤泥质和泥炭等软弱地基土,直接采用强夯法不能取得较好的效果,一直被认为是强夯法适用的“盲区”,必须设置竖向排水通道以利孔隙水压力消散,由此产生了强夯法联合袋装砂井或塑料排水板等方法,但实际应用不多。近年来国内外发展起来的强夯置换法复合地基,已较好地解决了上述问题并已成为我国沿海地区“填海造地”后对深层软土加固处理的一种重要手段。

地基处理作为岩土工程的一个分支,其目的是服务于工程实践,有时表现出理论落后于实践的现象。而强夯法作为一种得到普遍推广的地基处理方法,在该问题上表现得更为明显,由于影响强夯效果的因素众多,加固机理复杂,难以建立起一套完整而又符合实际的理论体系,自 Menard 提出有名的 Menard 公式以来的近三十年里,强夯法施工设计便一直处于一种半经验状态,其理论研究虽在近年来得到了一定的积累,但距理论指导工程实践的程度尚需时日,因此有必要对强夯法进行更深入的研究。

2.2 强夯加固机理

关于强夯法加固地基的机理,国内外许多学者从不同的角度进行了大量的研究,看法很不一致。一般认为在不饱和的土层中,强夯法的作用与填土夯实作用的原理相似,当土层的含水率接近黏性土的塑性限度或砂土的最佳含水率时夯实效果最好,在土层深处的夯实效果由于应力分布和振动波衰减而迅速变差。在饱和的无黏性土层中,强夯可引起深层土的液化。这是因为在饱和土中,从振源发出的纵波(压缩波)可以传到土层较深处,从而产生超静水压力并使抗剪强度大大降低,随之而来的横波(剪切波,速度低于压缩波)可破坏土的原有结构,从而使土颗粒重新排列成为较密实的新结构。于是地基经过强夯后,其强度提高过程则一般可分为如下四阶段:①夯击能量转化,同时伴随强制压缩或振密(包括气体的排出,孔隙水上升);②土体液化或土体结构破坏(表现为土体强度降低或抗剪强度丧失);③排水固结法压密,表现为渗透性的改变,土体裂隙发展,土体强度提高;④触变恢复并伴随固结压密(包括部分自由水又变成薄膜水,

土的强度继续提高)。其中第一阶段是瞬时发生的;第四阶段是在强夯终止后很长时间才能完成,需几个月以上;中间两个阶段则介于前述二者之间产生。但到目前为止,强夯还没有一套成熟的理论和设计计算方法,所以还需要不断地在实践中总结和完善的。

1981年 Mitchell 在第十届国际土力学及基础工程会议上的地基土加固技术进展报告中提出:强夯对饱和细颗粒土的效果尚不明确,成功和失败的例子均有报道,对于这类饱和细颗粒土,需要破坏土的结构,产生超孔隙水压力以及通过裂隙形成排水通道,孔隙水压力消散,土体才会被压密。颗粒较细的土达不到颗粒较粗的土那样的加固程度。软黏土层和泥炭土由于其柔性阻止了邻近的无黏性土的充分压密,但当强夯法应用于非饱和土时,压密基本上同实验中的击实法相同,在饱和和无黏性土的情况下,可能会产生液化,压密过程同爆破和振动压密的过程相似。Smolczyk(1983年)则认为,强夯法只适用于塑性指数小于1的土,强夯引起很高的孔隙水压力,形成细微裂缝利于排水,因此,需在下一遍夯击前保持足够的间歇时间使孔隙水压力消散。显然,这些条件对饱和和软黏土,特别是对塑性指数高、渗透系数小的软黏土难以达到,强力夯击反而会使软黏土原有结构破坏,土的强度长期不能恢复和增大。

Leon 认为,考虑到强夯法加固地基的方式,加固作用应与土层在被处理过程中三种明显不同的机理有关。即:①加密作用,指空气或气体的排出;②固结作用,指水或流体的排出;③预加变形作用,指各种颗粒成分在结构上的重新排列,还包括颗粒组构成或形态的改变。基于以上论点,Leon 认为强夯法应叫做“动力预压处理法”,这样才能把上述三种机理都包括进去。显然,由于土的类型多,作用机理非常复杂,他认为不可能建立对各类地基具有普遍意义的理论。

范炜垣指出,关于强夯机理,首先应该分为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,黏性土与无黏性土还应加以区分。另外,对特殊土,如湿陷性黄土等,应该考虑它的特征。

总之,由于地基土的类型不同,它们在结构、构造、密实度、内聚力、渗透性等各方面都不同,这些都会影响其加固效果,而从外部情况来看,单击夯击能、单位面积夯击能、锤底面积、夯点布置、夯击遍数等也都会影响其加固效果。所以,许多学者从不同角度对强夯机理作出的解释,可以互为补充,以形成系统的解释。

2.2.1 动力固结理论

动力固结是指土体在动载荷作用下所产生的超孔隙水压力和超孔隙气压力随时间增长而消散,最终达到加载以前量值的现象。饱和土的固结要考虑孔隙

水从土结构中流出造成的土体积变化；非饱和土则应考虑空气与水的流动同时发生所造成的土体积变化；而干土则需考虑土结构或气相体积的变化。

2.2.1.1 土的特性

土是一种由固体、液体和气体组成的三相混合体，从研究固结的角度看，土可分为饱和土和非饱和土；饱和土是由土体中固体和液体组成，而非饱和土是由土中三种混合体（即由固体、液体和气体）组成。

固体为多种矿物质组成，它是岩石风化的产物，由于母岩成分和风化程度的不同，所形成的矿物类型和颗粒大小也不同，这种矿物质大致可分为原生矿物和次生矿物。原生矿物又称为非黏土矿物，包括石英、云母、长石、角闪石等，这类矿物质化学性质较稳定，有较强的抗力性和抗风化能力，次生矿物又称黏土矿物，主要是由各种硅酸盐类矿物分解形成的含水铝硅酸盐组成，如高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石等，由于它们的颗粒小，形成土中的黏粒，称为黏土矿物。

液相是指水或溶解水。水在土中的存在有液态、气态和固态三种形式，对土产生较大影响的是液态水，之所以对于强夯机理的认识难以统一，关键是对土中水的认识不够，尤其是对饱和土而言，因其属二相体系，且均为不可压缩体，如要提高土体承载力，则须减少土中的液态水。土中的液态水主要是指表面结合水和自由水两大类，土粒表面由于带负电吸引水分子而形成的结合水膜称为表面结合水，水膜内层为强结合水，其性质接近固体，有较大的抗剪强度，水膜外层为弱结合水，其性质呈黏滞体状态，其对黏性土的物理力学性质影响最大。自由水又可分为重力水和毛细水两种，重力水存在于地下水位以下的土孔隙中，只受重力作用，能传递水压力和产生浮力，毛细水存在于地下水位以上的土孔隙中，在土粒之间形成环状弯液面，弯液面与土粒接触处的表面张力反作用于土粒，形成毛细压力使土粒挤紧，土粒间的孔隙相贯通，形成无数不规则的毛细管。表面张力作用下，地下水沿着毛细管上升，在强夯施工过程中，影响作用最大的是自由水。

2.2.1.2 饱和土的强夯加固

采用强夯法处理细颗粒饱和土，则是借助于动力固结的理论，即巨大的冲击能量在土中产生很大的应力波，破坏了土体原有的结构，使土体局部发生液化并产生许多裂隙，增加了排水通道，使孔隙水顺利逸出，待超孔隙水压力消散后，土体固结。

传统的饱和土固结理论创立者 Terzaghi 认为，假定水和土粒本身是不可压缩的，固结就是孔隙体积缩小及孔隙水排出。饱和土体在瞬间冲击荷载作用下，由于渗透性低，孔隙水无法在瞬间排出，因而土体积不变，只发生侧向变形，从而在夯击时饱和土造成侧面隆起，重夯时形成“橡皮土”现象。

强夯理论则不同, L. Menard 根据饱和土体在夯击瞬间产生数十厘米沉降现象, 提出了一个新的模型——Menard 模型解释动力固结机理, 认为对于饱和土, 理论上是土和水组成的二相体系, 但实际上由于液体中可溶性气体的存在, 以及毛细管封闭一定量的气体等而导致少量气体的存在(约 4%)。两个模型如图 2-1 所示。

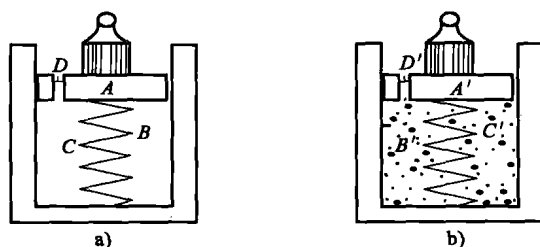


图 2-1 太沙基模型与动力固结模型的对比

a) 太沙基模型; b) 动力固结模型

A-无摩擦活塞; A'-有摩擦活塞; B-不可压缩液体; B'-含有少量气泡, 液体可压缩; C-定比弹簧; C'-不定比弹簧; D-不变孔径; D'-可变孔径

Menard 动力固结模型具有如下特点:

(1) 有摩擦的活塞

由于土中有机物的分解, 土中总存在一些微小气泡, 土颗粒之间的孔隙水也有孔隙可压缩, 其体积占土体整个体积的 1%~3%, 最多可达 4%。夯击土被压缩后含有空气的孔隙水具有滞后现象, 气相体积不能立即膨胀, 即夯坑较深的压密土被外围土约束而不能膨胀, 这一特征用有摩擦的活塞表示。

(2) 液体可压缩

土体受夯击时, 气体体积被压缩, 孔隙水压力增大, 随后气体有所膨胀, 孔隙水排出, 孔隙水压力减小, 固相体积始终可认为不变, 这样每夯击一遍, 液体体积就有所减小, 气体体积也有所减小。因此, Menard 模型可体现饱和土在夯击能作用下所具有的可压缩性。

(3) 不定比弹簧

夯击时土体结构被破坏, 土粒周围的弱结合水由于振动和温度影响, 定向排列被打乱及束缚作用降低, 弱结合水变为自由水, 因此弹簧刚度是可变的。

(4) 变孔径排水活塞

夯击能以波的形式传播, 强夯时在很大的夯击能作用下, 土体中出现很大的应力和冲击波, 同时夯锤下土体被压密, 产生对外围的土的挤压作用, 使土中应力场重新分布, 土中某点拉应力大于土的抗拉强度, 致使地基内部出现裂隙, 形

成树枝状排水网络。同时夯击时土体局部液化,这一瞬间的孔隙水压力等于总压力所产生的超孔隙水压力,使土颗粒之间出现裂隙,形成排水通道,土的渗透系数陡增。这一特性可用液体排出所形成的可变孔径小孔来描述。

根据 L. Menard 提出的模型,饱和土强夯加固机理可以描述为: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,动应力往往大于孔隙压力,有效动应力使土体产生塑性变形,破坏土的结构。对于砂土,迫使土的颗粒重新排列而密实;对于饱和土则是动力夯实;对于细颗粒土, Menard 教授认为,大约 1%~4% 的气体(以气泡形式存在)体积被压缩的同时,土体中的水和土体颗粒的两种介质引起不同的振动效应,二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卸载阶段夯击能卸去后,总的动应力瞬间消失,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,将引起砂土、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、渗透系数剧增,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、冒水等现象,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。在砂土中,孔隙水压力大约 3~5min 内消散,使砂土进一步密实。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,土的强度得到恢复和提高,从而达到加固地基之目的。如果在加载和卸载阶段形成的最大孔隙水压力不能使土体开裂,也不能使土体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,土的结构就被扰动破坏,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,从而形成橡皮土。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,地表水接近饱和,夯击能量为 3 000kN·m,结果地基形成橡皮土,未能达到预期目的,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,选择强夯能量和施工工艺,检查能否产生动力固结和触变恢复。