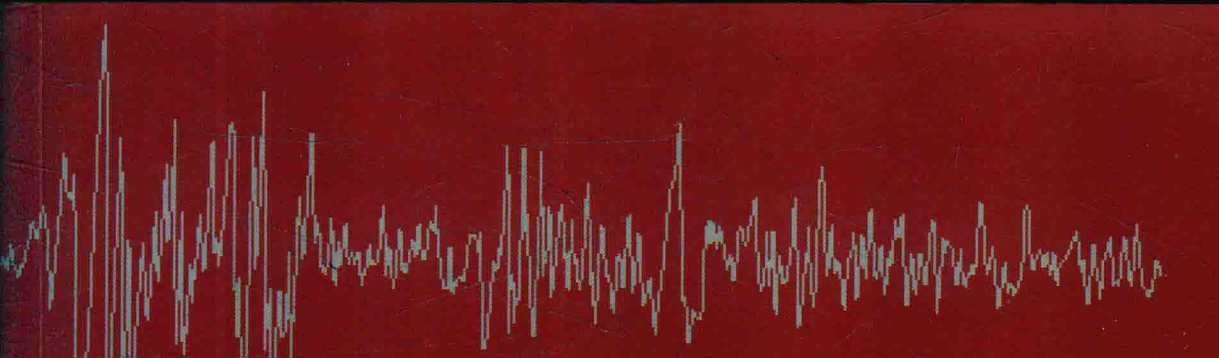




Study on New Technology of Ground-liquefaction-evaluation
and Foundation Strengthening

地基基础液化鉴定 与加固新技术研究

杨润林 © 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

地基基础液化鉴定 与加固新技术研究

杨润林 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

地基基础液化鉴定与加固新技术研究/杨润林著. —北京: 知识产权出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5130-5641-0

I. ①地… II. ①杨… III. ①地基液化—鉴定②地基—基础 (工程)—加固—研究

IV. ①TU441②TU753

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 136438 号

内容提要

本书共 5 篇 11 章。第一篇主要介绍地基液化领域目前的研究成果和现状; 第二篇重点介绍地基液化数值模拟方面的相关成果; 第三篇针对地基液化鉴定技术, 阐述了一种可用于地基液化空间差异性分析的多维变尺度评估新方法; 第四篇针对研究提出的孔眼式钢管桩群体系, 结合一系列试验研究分析了其抗液化效果; 第五篇为全书的总结, 阐述了本书主要的研究成果。

本书的研究成果具有一定创新性, 可以和传统的地基抗液化加固技术方法进行对比参照, 可供土木工程相关设计、施工和科研工作者参考。

责任编辑: 张雪梅

责任校对: 谷 洋

封面设计: 睿思视界

责任印制: 刘译文

地基基础液化鉴定与加固新技术研究

杨润林 著

出版发行: 知识产权出版社 有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

社 址: 北京市海淀区气象路 50 号院

邮 编: 100081

责编电话: 010-82000860 转 8171

责编邮箱: 410746564@qq.com

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

发行传真: 010-82000893/82005070/82000270

印 刷: 三河市国英印务有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本: 720mm×1000mm 1/16

印 张: 10.75

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

印 次: 2018 年 6 月第 1 次印刷

字 数: 170 千字

定 价: 69.00 元

ISBN 978-7-5130-5641-0

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

在工程抗震研究领域,地基液化是个永恒的话题。仅以国内为例,无论四十多年前的唐山地震还是十年前的汶川地震,都出现了严重的地基液化问题。当土体具有液化趋势时,意味着土体颗粒之间彼此逐渐脱离接触,直至悬浮于液态水中,表现出流体一类的变形特征,就会部分直至完全丧失承载力,造成地基不均匀沉降,从而导致上部结构倾斜甚至倒塌,风险极大。因此,研究工程地基基础的抗液化性能历来是非常重要的。

本书内容主要围绕重要建筑地基基础的液化鉴定和加固技术展开:第一篇简要介绍地基液化研究背景及现状;第二篇主要介绍地基基础抗液化加固数值模拟的相关成果,重点研究碎石桩对于加固可液化地基和提高桩基础抗震性能的实际效果,并为后续试验过程中与孔眼式钢管桩的效果相对比奠定基础;考虑到常规液化指数法无法针对地基液化性能进行三维空间差异性分析的局限性,第三篇提出了一种可用于地基液化性能评估的多维变尺度分析新方法,它可以将地基液化性能的评定分析由孔细化到测点,并沿任意方位进行,且结合工程实例进行了阐述;第四篇提出一种新型的孔眼式钢管桩群体以解决地基液化问题,并结合一系列试验与碎石桩进行抗液化效果对比,以验证其有效性;第五篇为全书的系统性总结,阐述了主要研究成果以及相关技术的应用前景。笔者在本书中引入了课题最新的研究成果,希望能起到抛砖引玉的作用,进一步深化相关方面的研究。

本书的研究工作得到了“十二五”国家科技支撑计划项目课题(2015BAK14B02)的支持,书中涉及的文献资料包括公开发表的著作、论文和各种规范等,已尽可能地罗列于参考文献之中,但难免百密一疏,若有遗漏在此表示歉意。

中国建筑科学研究院地基所的王曙光和郇道怀研究员对本书的撰写提出了非常具有建设性的意见,孙大圣、高强、马成金、张雨和许启民等分别参加了本书数值计算、试验执行和图文修改等工作,在此一并表示衷心的感谢和诚挚的敬意。

在撰写过程中笔者尽可能做到深入浅出、通俗易懂,以扩大读者群体。本书若能对广大高校师生、科研人员和企业的工程技术人员有所帮助,笔者将甚感欣慰。限于笔者水平,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

目 录

第一篇 地基液化研究背景及现状

第 1 章 地基液化研究背景	3
1.1 引言	3
1.2 课题来源	5
第 2 章 地基基础液化研究现状	6
2.1 地基液化研究现状	6
2.2 地基液化鉴定研究现状	7
2.3 地基抗液化措施研究现状	10
2.4 碎石桩加固可液化地基研究现状	14
2.5 液化场地桩基抗震性能研究现状	17
2.6 当前研究的不足	21
第 3 章 本书涉及的关键技术问题	23
3.1 地基液化性能鉴定新技术	23
3.2 地基基础抗液化加固新技术	23

第二篇 地基基础抗液化加固数值模拟

第 4 章 采用碎石桩加固的地基抗液化性能	27
4.1 计算参数	27
4.2 模拟结果分析	30
4.3 小结	51
第 5 章 碎石桩位置对地基局部抗液化性能的影响	52
5.1 建立计算模型	52
5.2 模拟结果分析	55
5.3 小结	64

第6章 碎石桩围护的混凝土桩基础的抗震性能 65

- 6.1 建立计算模型 66
- 6.2 模拟结果分析 68
- 6.3 小结 75

第三篇 地基液化性能的鉴定评估

第7章 基于液化梯度分析的地基液化性能多维变尺度评估方法 79

- 7.1 地基液化评判方法简述 79
- 7.2 液化指数评判方法的局限性 80
- 7.3 地基液化性能多维变尺度分析法 81
- 7.4 小结 84

第8章 工程实例分析 85

- 8.1 工程背景 85
- 8.2 工程应用实例分析 87

第四篇 地基基础抗液化加固试验

第9章 地基抗液化性能试验 105

- 9.1 纯地基条件下地基抗液化性能试验 105
- 9.2 设置碎石桩条件下地基抗液化性能试验 113
- 9.3 设置孔眼式钢管桩条件下地基抗液化性能试验 120
- 9.4 试验结果分析 128

第10章 桩基础抗液化加固试验 129

- 10.1 纯地基条件下桩基础抗液化性能试验 129
- 10.2 碎石桩地基条件下桩基础抗液化性能试验 138
- 10.3 孔眼式钢管桩地基条件下桩基础抗液化性能试验 146
- 10.4 试验结果分析 154

第五篇 研究成果总结

第11章 本书主要研究成果 157

- 11.1 地基液化性能鉴定新技术小结 157
- 11.2 地基基础抗液化加固新技术小结 158

参考文献 161

第一篇

地基液化研究背景及现状

第 1 章 地基液化研究背景

1.1 引言

在各类自然灾害中，地震具有难以想象的破坏力，历来被视为灾害之首。在地震发生的短短数十秒内，其直接影响区域内的建筑物或基础设施可能会瞬间损毁。地震对建筑物的破坏包括两种情况：一种是上部建筑结构由于振动效应而遭受破坏，另一种则是由于地基基础失效而引起的破坏。因此，研究地基基础的抗震性能是非常重要的。

地基液化是震害的主要表现形式之一，它是指含水率接近饱和的地基土体受地震等外部振动荷载的持续作用，土体骨架逐渐破坏，继而表现出类似液体具有流动性的一类地基变形现象（图 1.1）。地基液化与否和土质条件紧密相关，如松砂或粉土地基在动力荷载及流体作用下易于液化。在地基土体液化的过程中常常伴随着地下水从地表冒出、地基局部或整体沉降、上部建筑物发生倾斜或整体倒塌等震害现象。土体发生不同程度的液化后，地基将部分甚至完全丧失承载力，后果通常是非常严重的。

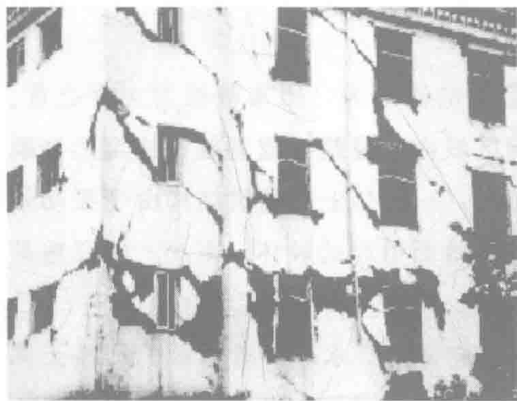


图 1.1 地震引起的液化现象

在国内，地震导致地基液化的工程实例很多。例如，发生于 1976 年的唐山

地震^[1]震级为里氏 7.8 级。灾后调查发现,地基土体发生了严重的液化现象,涉及唐山地区、天津地区和北京部分地区,导致大量的桥梁和建筑物遭到严重破坏,甚至完全倒塌。

发生于 2008 年的汶川地震^[2]具有波及地域广和破坏性强的鲜明特点,地震引起的伤亡很大,经济损失严重。在地震发生的过程中,液化现象十分明显^[3]。震后调查发现,震区内地面出现了喷砂冒水点,多处房屋因此偏移或者整体倒塌(图 1.2)。



(a) 倾斜、开裂的居民楼



(b) 倒塌的民房

图 1.2 汶川大地震中破坏的房屋

在国外,由地震诱发的地基液化的实例也很多。美国舍费尔德土坝坝底为砂土地基且处于饱和状态,在 1925 年遭遇地震,致使坝底地基液化,大坝瞬间解体崩塌(图 1.3)。

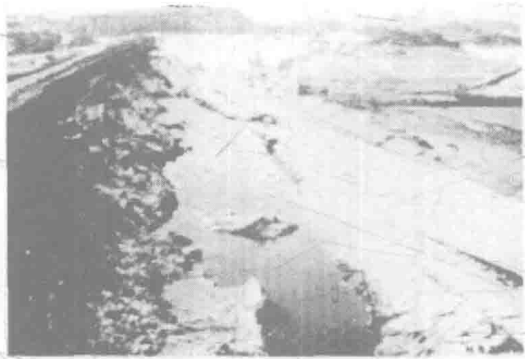


图 1.3 舍费尔德土坝的破坏

日本新潟地震^[4](1964 年)发生过程中,部分建筑下的砂土地基在急剧上升的孔隙水压力作用下流动、漂浮,致使上部建筑物出现不同程度的倾斜甚至倒塌(图 1.4)。



图 1.4 新潟地震中建筑物发生严重倾斜

鉴于此,地震诱发的土体液化而造成的震害已引起国内外抗震工作者的高度重视,相应的研究也成为岩土工程抗震领域的重点研究方向之一。研究地基土体的液化性能鉴定和加固处理具有十分重要的意义,可为地基基础施工设计提供可靠的理论依据和技术支撑,从而减轻地震作用对地基和基础的破坏,保障人民生命和财产的安全。

1.2 课题来源

本书的研究内容受“十二五”国家科技支撑计划项目“城镇要害系统综合防灾关键技术研究示范”(2015BAK14B00)资助,隶属于课题“城镇重要功能节点和脆弱区灾害承载力评估与处置技术”(2015BAK14B02)。

本书主要研究工作包括:基于场地液化程度空间差异性分析,形成地震作用下重要建筑地基基础抗液化性能鉴定评估技术,并进行建筑场地的液化风险分析;基于场地的液化风险评估分析,提出一种新型的地震作用下重要建筑地基基础抗液化加固的方法。

第 2 章 地基基础液化研究现状

2.1 地基液化研究现状

1964 年, 位于地震多发区的日本新潟发生了里氏 7.5 级的地震, 地震波及区域内液化现象明显, 高层建筑物损坏严重。同年, 在美国两大地震多发州之一的阿拉斯加州南部海峡发生了里氏 8.4 级的地震, 地震影响区域内土体发生了不同程度的液化, 高层或占地较广的建筑物差不多均遭受破坏。自此, 从工程实践的角度国内外研究者深刻意识到了地基液化危害的严重性, 开始针对这一问题展开全面和系统的研究。

1966 年 Seed 和 Lee 首次在饱和密砂固结不排水动三轴试验中发现孔隙水压力上升, 这将导致饱和密砂“液化”现象, 证明了循环流动性的存在, 并提出了“初始液化”的概念^[5]。之后, 国外学者掀起了关于地震诱发的砂土液化及地震作用下饱和砂土中振动孔隙水压力变化规律研究的热潮, 以 Martin 和 Finn^[6], Seed 和 Idriss 等人的研究最具代表性。除了地震过程中土体的动水压力, 一些学者还将研究焦点放在土体加速度、砂土孔隙比等方面。譬如, 马斯洛夫^[7]根据砂土的振动压密试验结果提出了临界加速度的概念, 并建立了一套饱和砂土稳定性动力破坏的渗透理论。1975 年, Casagrande^[8]对之前提出的“临界孔隙比”的概念和试验方法作了重新调整和优化, 提出“流动结构”“稳态变形”“稳态强度”等概念。

我国学者对液化土的研究始于 20 世纪 60 年代。1961 年黄文熙^[9]提出用动三轴试验手段研究砂土液化, 为后续研究开辟了途径。汪闻韶^[10]研究了饱和砂土振动孔隙水压力的产生、扩散与消散, 把饱和液化土(砂土)的液化机理归纳为循环活动性(cyclic mobility)、流滑(flow slide)和砂沸(sand boil)三种类型。

刘颖等^[11]探讨了循环荷载作用下饱和砂土的极限平衡条件和液化破坏过

程,给出了一个可用于饱和砂层地震稳定性分析的广义库伦公式,根据对砂土液化试验记录的分析给出饱和砂土的动力有效应力抗剪强度。为了达到工程应用的目的,文献[11]中考虑把循环荷载作用下饱和砂土的破坏过程分为两个阶段,并把这两个阶段的起点作为饱和砂土的破坏准则,此外还给出了饱和砂土液化破坏时破坏面上循环剪应力与循环荷载次数间的一般关系,为后续饱和砂土液化机理的研究提供了参考。

徐志英等^[12]在 Seed 等提出的复合地基桩间土动力控制方程的基础上考虑到动剪应变与动剪切模量之间的非线性关系,以及振动孔隙水压力增长效应(砂土软化)逐渐变化的动力性质,提出了计算饱和土体地震反应的二维动力分析方法,可以求得地震过程中饱和土体的加速度、动应力、动应变以及振动孔隙水压力随着时间的变化、液化的开始和发展过程。

周健等^[13-15]提出了一种包含 Biot 固结方程的二维伪相互振动固结方程,并在计算过程中分段考虑了孔压的增长、消耗和扩散过程,进而推广到三维空间。

刘汉龙等^[16-18]基于应变空间多重剪切机构塑性模型提出了一种地震液化后地面侧向变形的估计方法,并同实际震害现象进行了对比,显示出较好的一致性。

2.2 地基液化鉴定研究现状

在砂土或粉土分布广泛的地区,地震液化是导致地基失稳和上部结构受损的直接原因之一,因此针对当地抗震设防烈度进行相应的地基液化评定是这类工程场地开展岩土地震稳定性评价的重要组成部分,必须予以高度重视。

2.2.1 砂土或粉土地基液化判定方法的研究现状

曾凡振等^[19]以我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)为基础,结合美国国家地震研究中心(NCEER)建议并由美国规范 ASCE/SEI7-05(minimum design loads for buildings and other structures)推荐的液化判别方法,介绍了中美抗震规范的地基液化判别方法,并对两国规范中地基土体液化判别方法考虑的主要因素及其可靠性进行了分析比较。通过实例对比分析,结果表明:虽然两国规范都采用以标准贯入试验(SPT-N)为主的经验判别方法,但美国规

范考虑的液化影响因素比较全面,而我国规范的地基液化判别标准在某些条件下偏于保守,在某些条件下又偏于不安全。

由于获得高质量未扰动砂土样存在困难和试验成本的限制,基于静力触探(CPT)的原位测试方法通常用于砂土液化势的评价。目前,基于CPT测试资料已经提出了许多砂土液化势的评价方法,国内通常采用规范推荐的基于标准贯入试验的砂土液化判别方法,而欧美、非洲及东南亚国家大多采用Seed简化法。

蔡国军等^[20]在对我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)中砂土液化判别方法与国外修正的Seed简化法的原理、方法及参数进行分析的基础上讨论了两种方法的差异。由于这些差异的存在,采用不同方法判别砂土液化可能性时会得出不同的甚至是相反的结果。

根据国内外文献资料,任红梅等^[21]从三方面总结了饱和砂土研究的最新进展,即饱和砂土液化判别方法、砂土液化的试验研究和液化后分析,特别探讨了液化对上部结构的影响,指出了存在的问题和今后的研究方向。

陈国兴等^[22]回顾了以标贯试验和地表峰值加速度为依据的砂土液化判别方法的演化历史,以及依据Idriss-Boulanger确定液化临界曲线的基本方法,提出了确定液化临界曲线的基本原则,并分别依据美国液化数据库、中国抗震规范液化判别式所用的液化数据及综合两者的液化数据资料,给出了相应的液化临界曲线,验证了液化临界曲线的位置对不同的细粒含量、有效上覆压力、现场试验方法的液化数据的合理性,分析了测量或估计土层循环应力比和修正标贯击数各种因素的不确定性对液化临界曲线的敏感性。结果表明:所提出的液化临界曲线不易受各种因素的影响。他利用Monte-Carlo模拟、加权最大似然法和加权经验概率法,给出了液化临界曲线的名义抗液化安全系数与液化概率的经验关系式及概率等值线。

路江鑫等^[23]对地震荷载作用下不同深度饱和粉土地基的液化特性进行了研究,通过室内动三轴试验研究地震荷载作用下饱和粉土地基的最大可液化深度。试验中通过对给定不同应力幅值动荷载作用下饱和粉土的液化特性进行研究,得到不同地震烈度下不同深度土体的动剪应力比与破坏振次关系曲线,进而结合地基液化判别公式判断不同深度饱和粉土在不同地震烈度下是否发生液化。其研究成果为高烈度地区确定抗液化措施及处理深度提供了依据。

张继红等^[24]通过对 11 项典型工程场地进行原位取土及双桥静力触探原位测试分析,重点研究了上海地区薄层黏性土(或黏质粉土)夹层对液化判别的影响,统计分析了锥尖阻力 q_c 、摩阻比 R_f 与土层黏粒含量的相关关系,提出了完全依据双桥静力触探试验的地基液化判别方法。

2.2.2 碎石桩地基条件下液化鉴定的研究现状

许明军等^[25]就目前国内外碎石桩处理液化地基抗液化理论、动力分析以及液化判别等方面的研究做了简要归纳和评述,介绍了在理论研究如碎石桩排水效应和桩体效应方面取得的进展,同时指出了碎石桩处理液化地基判别标准方面发展较慢的问题。

周元强等^[26]针对目前适用于碎石桩复合地基液化判别方法相对缺乏的现状,依据碎石桩复合地基中地震剪应力按碎石桩和桩间土刚度进行分配的思路,以 Seed 剪应力法和美国 NCEER 协会推荐的抗液化剪应力比公式为基础,提出适用于碎石桩复合地基的液化判别方法,并采用有限元数值模拟方法模拟了地震中碎石桩复合地基桩间土的剪应力变化。模拟分析结果表明,设置碎石桩后桩间土的地震剪应力小于设置碎石桩前的地震剪应力,说明刚度较大的碎石桩分担了较大的地震剪应力,而刚度较小的桩间土分担了较小的地震剪应力。最后对比了有限元数值模拟结果、我国规范法判别结果和建议方法的判别结果,得出一种碎石桩复合地基的液化判别方法。

卢红前等^[27]通过研究,综合考虑了碎石桩复合地基的挤密和振密效应、减震效应、排水减压效应,提出了一种基于场地超孔隙水压比的碎石桩复合地基抗液化判别方法。该方法以《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)为基础,反映了设计基本地震加速度、液化判别标准贯入锤击数基准值、液化指数和场地超孔隙水压比之间的内在联系。

郑建国^[28]通过一系列现场原位试验,指出碎石桩对可液化软弱地基具有三方面的加固作用,即对可液化土层的挤密和振密作用、减震作用及排水作用,提出了碎石桩复合地基液化判别的方法。他指出,在判别碎石桩复合地基液化可能性时,应当同时考虑上述三方面作用。对于桩间土的液化判别临界标贯击数,他认为应在天然地基液化临界标贯击数的基础上进行折减。

2.3 地基抗液化措施研究现状

目前常用的砂土地基抗液化措施有置换、加密、上覆压重、围封、桩基础等,应根据具体工程实际情况选用。

1. 置换

若要从根本上解决土质条件,可将上部可液化土层挖除,并用非液化土置换。可液化土层的挖除情况视土层厚度而定:易液化土层厚度不大时,可全部挖除;易液化土层较厚时,从实际工程的角度考虑,只能部分挖除。土层的置换厚度应根据需置换软弱土的深度或下卧土层的承载力确定,并符合下式要求^[29]:

$$p_z + p_{cz} \leq f_{az} \quad (2.1)$$

式中, p_z ——相应于作用的标准组合时软弱下卧层顶面处的附加压力值;

p_{cz} ——软弱下卧层顶面处土的自重压力值 (kPa);

f_{az} ——软弱下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值 (kPa)。

垫层底面处的附加压力值 p_z 可分别按下式计算:

条形基础

$$p_z = \frac{b(p_k - p_c)}{b + 2z \tan \theta} \quad (2.2)$$

矩形基础

$$p_z = \frac{bl(p_k - p_c)}{(b + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta)} \quad (2.3)$$

以上式中, b ——矩形基础或条形基础底面的宽度 (m);

l ——矩形基础底面的长度 (m);

p_k ——相应于荷载效应标准组合时基础底面处的平均压力值 (kPa);

p_c ——基础底面处土的自重压力值 (kPa);

z ——基础底面至软弱下卧层顶面的距离 (m);

θ ——地基压力扩散线与垂直线的夹角 ($^\circ$),可按表 2.1 选用。

表 2.1 地基压力扩散角 θ

E_{s1}/E_{s2}	z/b	
	0.25	0.5
3	6°	23°
5	10°	25°
10	20°	30°

注：1. E_{s1} 为上层土压缩模量； E_{s2} 为下层土压缩模量。

2. $z/b < 0.25$ 时取 $\theta = 0^\circ$ ，必要时宜由试验确定； $z/b > 0.50$ 时 θ 值不变； z/b 为 $0.25 \sim 0.50$ 时可插值选用。

2. 加密

加密土体是一种广泛采用的地基处理方法^[30]，是指通过一定措施增加土体密实度。常见的加密土体的措施有爆炸振密法、强夯法和振冲碎石桩法等。

(1) 爆炸振密法

爆炸振密法利用炸药爆炸时产生的剧烈振动作用促使地基土层中土颗粒重新排列、固结，从而提高土体密实度。该法施工迅速、原理简单，一般应用于土颗粒较粗的地基土体处理。对于细砂、粉细砂以及黏粒含量较高的砂土，其加固效果较差，特别是当地表覆盖有黏土层、冻土层及地基中含有排水不良的夹层时，这种方法不宜使用。

(2) 强夯法

重锤由高处落下产生一定的动能，落在砂土地基表面，可使其内部土体颗粒排列更加紧凑，从而增大砂土密实度，增强地基抗液化性能。强夯法的加固机理主要是动力密实作用和动力固结作用。该法施工方便、速度快、费用低，但对地基土体的渗透性有要求，当地基土含有较多的黏粒、渗透系数很小时不宜采用。

强夯法的有效加固深度应根据现场试夯或当地经验确定，当缺乏试验资料和经验时可按下式计算：

$$H = k \sqrt{\frac{Mh}{10}} \quad (2.4)$$

式中， H ——有效加固深度 (m)；

M ——锤重 (kN)；