

建筑地基处理技术丛书

振冲法和砂石桩法 加固地基

徐至钧 主编
叶观宝 高彦斌 编著

.3

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



建筑地基处理技术丛书

振冲法和砂石桩法加固地基

徐至钧 主编
叶观宝 高彦斌 编者



机械工业出版社

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)已由建设部2002年第64号文发布,自2003年1月1日起实施。为了便于有关单位的工程技术人员更好地掌握和应用新规范,本书针对新规范中振冲法和砂石桩法加固地基的内容,深入介绍这种地基处理的设计、施工经验、地基处理的应用范围、质量检验及验收、技术经济分析等,并收集了大量工程应用实例,以便帮助读者加深对新规范的理解和应用。

本书可供设计施工工程技术人员在推广新技术中参考,也可供高等院校教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

振冲法和砂石桩法加固地基/叶观宝,高彦斌编著. —北京:机械工业出版社,2004.10

(建筑地基处理技术丛书)

ISBN 7-111-15264-6

I. 振... II. ①叶... ②高... III. 夯实加固
IV. TU472.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第094166号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号,邮政编码100037)

责任编辑:何文军 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版第1次印刷

890mm×1240mm A5·10.25印张·302千字

0 001—4 000册

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)已由建设部2002年第64号文发布,自2003年1月1日起实施。为了便于有关单位的工程技术人员更好地掌握和应用新规范,徐至钧组织编写了《建筑地基处理技术丛书》,针对新规范主要内容,分成七个专题,深入地介绍各种地基处理的设计、施工经验和地基处理的应用范围,并收集了大量工程应用实例,以帮助读者加深对新规范的理解和应用。

本书是这套丛书中的一本,详细介绍了振冲法和砂石桩法加固地基的经验。实践证明,振冲法和砂石桩法在我国许多工程中得以应用,是由于振冲法和砂石桩法加固地基,具有设备简单、施工方便、速度快、投资省、使用范围广等优点,尤其在处理液化地基时效果更加显著,所以在各种地基处理方法中是规范推荐的处理液化地基的最有效方法之一。本书主要介绍振冲法和砂石桩法的适用范围、加固地基的原理、设计计算、施工机具和施工工艺、质量检验等,并收集了各类有代表性的工程应用实例三十多例,并提出振冲法和砂石桩法的测试和研究工作成果。

本书可供设计施工工程技术人员在推广新技术中参考,也可供高等院校教师和研究生在工作中参考。

本书由同济大学叶观宝教授、高彦斌同志编著。第一篇振冲法由高彦斌编写,第二篇由叶观宝编写。在编写过程中还得到了王艳和肖媛媛同志的大力协助。

本书引用了许多科研和工程单位的一些科研成果和技术总结,谨向这些同志致以衷心的感谢。

IV

由于编者水平有限，本书若有不妥和错误之处，敬请读者不吝赐教。

编者

目 录

前言

第一篇 振 冲 法

第一章 概述	1
第二章 振冲法处理软弱地基原理	3
第一节 加固砂性土地基原理	3
第二节 加固粘性土地基原理	8
第三章 设计计算	10
第一节 砂性土地基振冲法设计计算	10
第二节 粘性土地基振冲法设计计算	13
第四章 振冲法施工	38
第一节 施工工艺	38
第二节 施工质量控制	55
第五章 施工质量与效果检测	58
第六章 工程实例	61
工程实例一 振冲加固法在粉土地基中的应用——杭州四堡污水处 理扩建工程二沉池桩基实例	61
工程实例二 三峡二期围堰风化砂砾振冲加固检测成果分析	65
工程实例三 红山水库主坝坝基振冲加固	71
工程实例四 在淤泥地基上建造高层楼房的振冲加固处理	79
工程实例五 振冲碎石桩法在土岩组合地基中的应用	84
工程实例六 振冲碎石桩在软土路基加固中的应用	91
工程实例七 上海市南市区人民法院法庭大楼振冲法加固软土地基 ..	93
工程实例八 振冲法加固内蒙古陕坝糖厂粘性土砂土互层地基	98

第二篇 砂 石 桩 法

第七章 概述	105
--------------	-----

第八章 加固原理	107
第一节 加固砂性土地基原理	107
第二节 加固粘性土地基原理	112
第九章 设计计算	116
第一节 一般设计原则	116
第二节 砂性土地基砂石桩设计计算	117
第三节 粘性土地基砂石桩设计计算	120
第十章 施工工艺	131
第一节 砂桩施工	131
第二节 碎石桩施工	137
第三节 振冲砂石桩施工	182
第四节 振冲碎石桩与振动沉管挤密砂石桩地基处理方法比较	188
第十一章 效果检验	194
第十二章 工程实例	197
工程实例一 寿春路商住楼填土地基挤密砂石桩加固工程	197
工程实例二 徐州光环钢管有限公司焊管车间碎石桩加固工程	204
工程实例三 北京乡村高尔夫球俱乐部挤密碎石桩处理液化加固工程	209
工程实例四 东黄输油管道东营首站罐区碎石桩加固工程	215
工程实例五 振动挤密碎石桩在高速公路软基处理中的应用	221
工程实例六 振动沉管挤密碎石桩加固松软尾矿坝体工程	225
工程实例七 挤密碎石桩与强夯结合处理较大厚度自重湿陷性黄土地基	228
工程实例八 沉管砂桩加固太原钢铁公司粘质粉土工程	232
工程实例九 徐州镀锌焊管厂扩建工程地基处理	235
工程实例十 原轻工业部管理干部学院挤密碎石桩处理粉土和粉质粘土地基加固工程	240
工程实例十一 中国石油天然气总公司管道局职工医院门诊楼地基加固	248
工程实例十二 青海钾肥厂二选厂浓密池地基处理	250
工程实例十三 中国轻工业管理干部学院三期扩建地基处理	255
工程实例十四 山西省财政厅办公大楼工程砂桩地基	264
工程实例十五 珠海石橢园综合楼锤击碎石桩工程	266

工程实例十六	振动挤密碎石桩处理粘性土填土地基	269
工程实例十七	振动挤密碎石桩法在粉煤灰地基处理中的应用	274
工程实例十八	振动挤密碎石桩与 CFG 桩联合应用处理地基	278
工程实例十九	徐宿高速公路碎石桩处理试验研究	281
工程实例二十	武汉取水楼住宅锤击碎石桩工程	293
工程实例二十一	沉管干振碎石桩对液化地基加固范围试验研究	295
工程实例二十二	干振碎石桩加固技术处理新近填土地基	299
工程实例二十三	水泥粉煤灰碎石桩的设计与施工	303
工程实例二十四	水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 复合地基的应用	309
工程实例二十五	砂桩在平蛇公路软弱地基处理中的应用	312
参考文献		317

第一篇 振 冲 法

第一章 概 述

利用振动和水冲加固土体的方法叫做振冲法 (vibroflotation)。振冲法最早是用来振密松砂地基的, 由德国 S.Steuerman 在 1936 年提出。在英、美称之为“vibroflotation”, 中国称它为“振动水冲法”, 简称“振冲法”。

为捣实大坝混凝土, 发明了振捣器。后来在振捣器的基础上, Steuerman 构思了利用振动和压力水冲切原理的振冲器。1937 年, Steuerman 供职的一家名叫 Johann Keller 的德国施工公司首先制成了一台具有现代振冲器形式的锥形振冲器, 用于处理柏林一幢建筑物的 7.5m 深的松砂地基, 结果将砂基的承载力提高了一倍, 相对密度由原来的 45% 提高到 80%, 取得了显著的加固效果 (Greenwood, 1976)。嗣后, Keller 公司大力推广这一方法, 在国内外进行了一大批砂基挤密工程, 取得了丰富的实践经验。

1957 年, 振冲法被引入英国。英国的工程师把电动振冲器改为用水力驱动, 并用它加固垃圾、碎砖瓦和粉煤灰。日本在 20 世纪 50 年代引进振冲法后, 用它加固油罐的松砂地基, 目的为提高砂基的抗液化能力。日本十腾冲地区于 1968 年发生 7.8 级强烈地震, 这次震害调查都表明, 经用振冲法处理过的砂基液化现象大为减弱, 建筑物基本保持完好; 而未经处理的砂基上的建筑物则受到严重破坏 (渡边隆, 1965; 土质工学会震害调查委员会, 1968)。

我国应用振冲法始于 1977 年, 由于大量工业民用建筑和水利、交通工程地基抗震加固的需要, 这一方法得到迅速推广。例如, 河北省怀来县官厅水库坝基松砂加密和河北省开滦煤矿钱家营矿区场地砂基加密等工程都取得了很好的处理效果和经济效益。近年来,

电力部北京勘测设计院研制了 75kW 大功率振冲器, 1985 年在四川省铜街子水电站工地用这一振冲器穿过厚达 8m 的漂卵石夹砂层对下面的细砂进行振密, 取得了良好的效果 (康景俊、尤立新, 1985)。

后来开始将振冲法应用于粘性土地基, 在粘性土中制造一群以石块、砂砾等散粒材料组成的桩体, 这些桩与原地基土一起构成所谓复合地基, 使承载力提高, 沉降减少。为此, 有人把这一方法称为“碎石桩法” (stone column method) 或“散粒桩法” (granular column method)。用桩体构成复合地基的加固方法是振冲法应用的一种扩大和创新。复合地基的加固机理和振冲加密砂基完全不同, 简单说来, 前者用振冲法在地基中以紧密的桩体材料置换一部分地土, 后者用振冲法使松砂变密。因此, 振冲法演变为两大分支, 一支是适用于砂基的“振冲密实” (vibrocompaction), 另一支是主要适用于粘性土地基的“振冲置换” (vibroreplacement)。

虽然振冲密实法在应用方面积累了丰富的实践经验, 但是在加密机理的认识和设计理论的开发方面还处在初级阶段, 设计工作基本上是根据已有工程的成功经验或者正式施工前的现场试验进行的。

中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002) 中规定: “振冲法适用于处理砂土、粉土、粉质粘土、素填土和杂填土等地基。对于处理不排水抗剪强度不小于 20kPa 的饱和粘性土和饱和黄土地基, 应在施工前通过现场试验确定其适用性。不加填料振冲加密适用于处理粘粒含量不大于 10% 的中砂、粗砂地基。”

第二章 振冲法处理软弱地基原理

第一节 加固砂性土地基原理

振冲密实法加固砂性土地基的原理，简单说来是一方面依靠振冲器的强力振动使饱和砂层发生液化，砂颗粒重新排列，孔隙减少；另一方面依靠振冲器的水平振动力，在加回填料的情况下还通过填料使砂层挤压加密，所以这一方法称为振冲密实法。

一、振密作用

在振冲器的振动作用下，地基土特别是松散砂土的颗粒会重新排列，体积缩小，表现为振冲过程中的地面下陷。振冲器在工作过程中，根据其在周围地基土中产生的振动加速度以及挤密效果从振冲器侧壁向外可以分为以下四个区域：

剪胀区：紧贴振冲器侧壁，该区振动加速度最大，砂土处于剪胀状态。

流态区：砂土受到较强的振动并受高压水冲击，土体处于流体状态，土颗粒有时联接，有时不联接。

过渡区和挤密区：砂土经受振动，结构开始逐渐破坏，但土颗粒仍保持联接，能够通过土骨架传递振动应力，并使砂土变密，形成新的密实结构的土。

弹性区：该区位于最外端，砂土受到的振动小，土体处于弹性变形状态，不能获得显著加密。

只有过渡区和挤密区才有明显的挤密作用。过渡区和挤密区的大小不仅与地基土的性质（如砂土起始相对密度、颗粒大小、形状

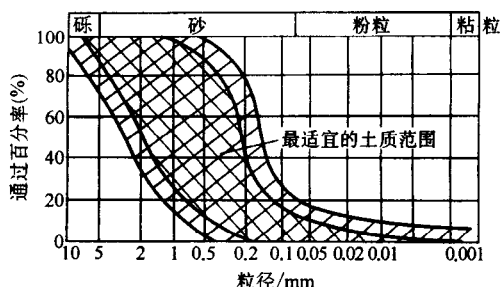


图 2-1 美国 VFC 公司给出的振冲加密法的有效范围

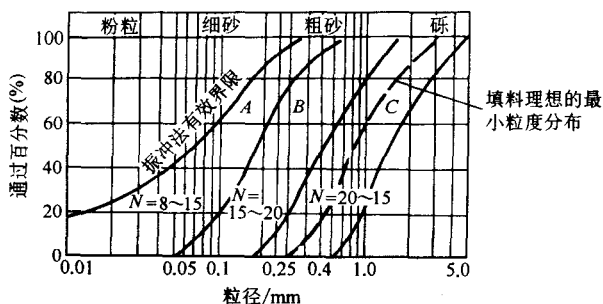


图 2-2 日本《港口建筑物设计标准》给出的振冲加密法的有效范围

N—标贯击数

和级配、渗透系数、埋深等)有关,还和振冲施工参数(如振动力、振动频率、振幅、振冲距)有关。对于土性对挤密的影响,各个国家经验有所不同,图 2-1 和图 2-2 为美国和日本采用的一些标准。从中可以看出,细颗粒($<0.074\text{mm}$)含量的增大会减小振冲法对砂性土的挤密效果。然而,以

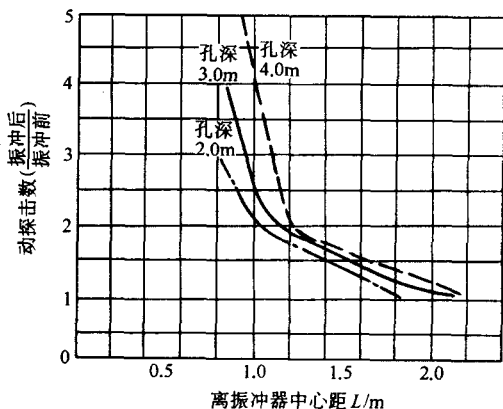


图 2-3 加密效果与振冲距关系

上标准在粉土中未必适用,实践表明,采用粘粒($<0.005\text{mm}$)含量来作为影响粉土的挤密因素要比细粒含量更为合理些。图 2-3 为振冲加密效果与振冲距离的关系,振冲距越近,加密效果越好。另外,从图中也可以看出,埋深较大的土层要比较浅的土层更容易被加密。

二、预振作用

振冲施工过程中会造成地基土的剧烈振动,从而会对液化砂土产生预振作用,提高砂基抗液化能力。根据 Finn 等在试验室内用小尺寸饱和砂样所作的单剪试验得出的砂土液化特性除与相对密度有

关外, 还与其振动应变史有关的结论。曾用大型振动台对相对密度为 54% 的砂样进行了试验, 通常这种砂样在应力比 0.185 条件下经过 4 次应力循环即发生初始液化。若事先对砂样施加 5 次相当于距离震中 8.9km, 震级为 5 级的地震作用进行预振, 然后仍在应力比为 0.185 条件下, 对此砂样施加相当于距震中 8.9km 发生一次 8 级地震那样的震动, 结果要施加到第 26 次应力循环时试样才发生液化, 即抗液化能力提高了 8 倍。图 2-4 是经过预振与未经预振作用的砂样产生初始液化的应力循环数与循环应力比对比曲线。

可以看出, 预振使砂土显著增加了抗液化能力。图 2-5 是实测到的距振冲点 2~8m 的最大地面水平加速度曲线, 可见振冲器通过与填料或土介质直接将振动能传向四周, 使附近的砾土受到强烈的预振。排水桩间距一般在 2m 以内, 每根桩施工时间 10 多分钟, 振动影响范围互相搭叠使加固区的地基土受到多次强烈振动, 类似于受到多次强烈地震的预振, 这对提高砂土地基抗液化能力十分有益。试验表明, 相对密度 54% 但受过预振的砂样其抗液化能力相当于相对密度为 80% 未受过预振的砂试样。

预振使砂土结构和体积发生的变化可视为影响液化势和孔隙水压力的主要原因。曾对相对密度 54% 的砂样施加 5 次预振作用, 其最大水平加速度为 $0.19g$, 应力循环平均作用 2.5~3 次, 每一次振动的应力比为 0.185, 结果第一次预振应力循环产生的超孔隙水压力比 (u/σ'_0) 约为 0.3, 第二次 0.16, 第三次 0.09, 第四次 0.06, 第五次只有 0.05, 每次预振后的超孔隙水压力都比上一次有所降低。在山东某现场对砂土先用振冲器预振, 然后进行振动孔隙水压测定, 测定的结果也表明预振后从振冲中心至 3.7m 处砂基的超孔隙水压力有明显降低。

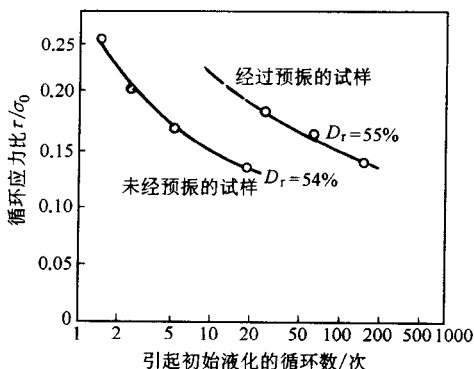


图 2-4 预振对砂土液化特性的影响

振冲施工参数如振动力、振动频率、振动时间都会直接影响到预振效果,目前还无法对振冲施工造成的预振效果进行定量评价。

三、挤密作用

如果忽略振冲过程中产生的振动密实作用,振冲碎石桩对地基土挤密作用则与干法碎石桩的挤密机理完全相同,通过在地基土中插入一定体积的桩体,从而对地基土达到挤密的目的。这种挤密桩桩间距越小、桩径越大,其挤密效果就越好。如果在挤密碎石桩施工前后,地面既不隆起也不下陷,那么桩体的体积就是地基土被挤密缩小的体积。然而由于实际工程的复杂性,有许多因素会影响到挤密效果,笔者将这些因素总结如下:

1. 碎石桩置换率

碎石桩置换率的大小将直接影响到挤密效果。碎石桩的桩间距越小,桩径越大,置换率越高,挤密效果也越好。当然,也不能简单地认为通过提高置换率就可以无限制地提高挤密效果,因为还有其他因素对实际挤密效果产生影响。

2. 细粒含量和粘粒含量

早在1977年, Saito便提出细颗粒($<0.074\text{mm}$)含量的多少将影响砂土的挤密效果。在碎石桩处理液化粉土地基的工程实践中,

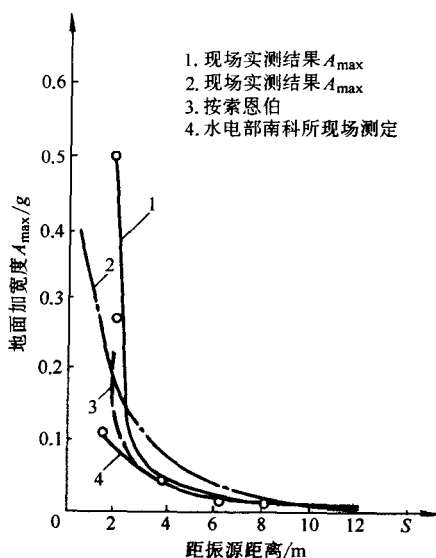


图 2-5 振冲法施工地面最大水平加速度实测结果

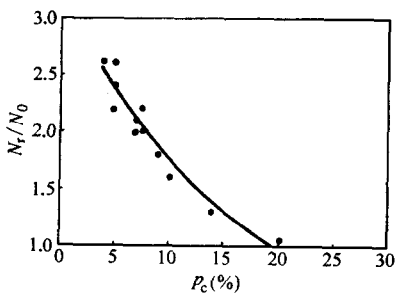


图 2-6 粘粒含量对挤密效果的影响

粘粒 ($<0.005\text{mm}$) 含量的大小将大大影响挤密效果。图 2-6 为某高速公路试验段的实测结果, 从中可以看出, 随着粘粒含量 ρ_c 的增加, 挤密前后标贯击数比 N_r/N_0 (N_0 为天然地基土实测标贯值, N_r 为挤密后实测标贯值) 减小。当 ρ_c 大于 20% 的时候, 土类属于粘性土, 处理前后的孔隙比以及实测标贯击数都变化不大, 挤密效果不明显。由于粉土地基不能被完全挤密, 因此现场地面会出现不同程度的隆起现象。

3. 埋深 Z

埋深越大, 上覆压力也越大, 挤密过程中也就越不易隆起, 挤密效果也就越好。埋深较浅的土层则相反。图 2-7 为某高速公路试验段在 2.30m 和 6.30m 两个深度的检测数据。对于相同的粘粒含量, 埋深为 6.30m 的实测值 N_r/N_0 明显比埋深为 2.30m 的实测值大。

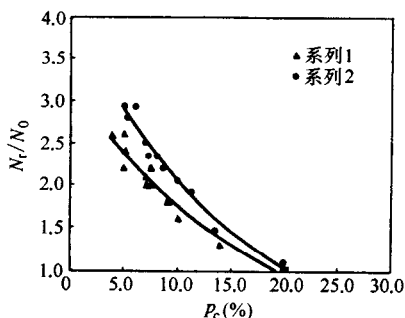


图 2-7 埋深对挤密效果的影响

注: 系列 1 埋深为 2.30m, 系列 2 埋深为 6.30m。

4. 地基土的初始密实度

当原地基的密实度较小时, 挤密效果十分明显。埋深较浅的砂性土和粉土, 由于自重应力较小, 天然孔隙比很大, 采用碎石桩挤密处理后 N_r/N_0 值有时高达 4.0 以上, 而一般 N_r/N_0 值在 1~3 之间。

5. 土层的均匀性

如果场地土层的均匀性较差, 如砂土和粉土层中有一些粘土夹层, 也会影响挤密效果。一方面这些粘土夹层将延长孔隙水压力的消散时间, 使得较短时间内难以达到应有的挤密效果。但是, 另一方面, 粉土中的粘性土夹层可能会提高最终加密效果。实践表明, 碎石桩复合地基中的粘性土是几乎不能被挤密的, 这一点可以从处理前后粘性土的标贯值以及孔隙比的大小中看出。桩长范围内的这些不能被挤密的粘性土会在碎石桩施工时向旁边的粉土挤动从而提高挤密效果, 这也就是为什么在粘性土夹层较厚的粉土地基中容易

发生测试挤密效果高于设计加密效果的原因。

综上所述,碎石桩置换率、细颗粒含量和粘粒含量、埋深、原地基的密实度、场地土的均匀性以及前面所提到的振冲施工振密作用都将影响到振冲碎石桩的挤密效果。

第二节 加固粘性土地基原理

一、排水作用

粘性土结构为蜂窝状或絮状结构,颗粒之间的分子吸引力较强,孔隙比很大,渗透系数很小,一般小于 10^{-4} cm/s。水是影响粘性土性质的主要因素之一,粘性土地基性质的改善很大程度上取决于其含水量和孔隙比的减小。在外界荷载作用下,饱和粘性土地基的沉降是随着时间而逐渐发生的,这样的沉降被称为固结沉降。工程师们希望这部分固结沉降结束的越早越好,而不希望在构筑物的使用期有大量的沉降产生,因为较大的沉降会影响建筑物的正常使用。另一方面,在地基处理工程进行期间或构筑物施工期间,如果能够让地基土尽快产生一定的压缩变形,对承载力的提高也有相当大的帮助。

所有这一切都要依赖于排水条件的改善,可以从两方面来达到这个目的:提高土的渗透性和缩短排水距离。天然饱和粘性土地基在外界荷载下,排水方向以垂直方向为主,即向上和向下排水,排水距离比较长,尤其是在压缩层厚度比较大的情况。在饱和粘性土地基中施工砂石桩后,由于砂石桩的渗透性较好,会吸引周围地基土中的水向砂石桩方向流动,从而缩短了排水距离,加快了地基的固结沉降速率。

二、桩体作用

在软弱地基中布置的振冲碎石桩与周围的土体共同承担上部荷载。如果建筑物的基础为刚性基础,则基础上产生的沉降各点相同,碎石桩和周围地基土变形协调,二者的变形也相同。由于刚度的不同,在等应变情况下,刚度较大的碎石桩上的应力要大于刚度较小的地基土的应力,也就是所谓的应力集中现象,人们通过桩土应力比来反映这种应力集中现象。在总荷载不变的情况下,桩土应力比

越大,地基土所承担的荷载也就越小。这样地基土的沉降就会减小,稳定性相应的提高。另外一方面,由于桩体的作用,可以将上部荷载传递到承载力较高、压缩性较低的持力层。需要特别指出的是,桩土应力比是一个较为复杂的参数,与上部荷载特性及大小、桩周土特性以及桩体特性都有密切的关系。研究表明,柔性荷载(路堤)和刚性基础下的桩土应力比差别较大。对于像碎石桩这样的散体材料桩,其桩土相互作用的荷载传递机理与刚性桩(灌注桩、预制桩)和半刚性桩(搅拌桩)都有所不同。这些都会影响到碎石桩桩体作用的发挥。

三、垫层作用

对于软弱土层较厚的情况,桩体有可能不能够穿透整个软弱土层。这样,整个软弱土层就分成两部分:上部为采用碎石桩处理形成的复合地基(复合地基层),下部为天然软弱土层(软弱下卧层)。研究表明,在外界荷载下,这种物理力学性质相差较大的双层地基的附加应力分布与均质地基中的附加应力分布有所不同。上部的碎石桩复合地基层起到一个垫层作用,将上部荷载按照一定的扩散角传递至下部的软弱下卧层,从而使下卧层受到的附加应力减小并趋向均匀。合理确定复合地基层的厚度,便可以满足下卧层的稳定性要求以及总沉降要求。

不是所有软弱地基中的振冲碎石桩都能够起到垫层作用,只有振冲碎石桩按照“短而密”布置且范围较大时,其荷载传递机理才近似于以上双层地基的荷载传递机理。

四、加筋作用

振冲碎石桩也可以用来防治地质灾害,提高边坡的稳定性。在边坡中施工的振冲碎石桩可以起到一般抗滑桩的作用,提高土体的抗剪强度,迫使最危险滑动面向土体深层移动,从而提高边坡的整体稳定性。在这种情况下,振冲碎石桩体的密实度要高,强度要大,只有这样才能充分发挥其抗剪功能。