

地基基础工程 环境效应

李 飞 郝子进 张亚仿 编 著

DIJI JICHU GONGCHENG HUANJING XIAOYING



河海大学出版社

DIJI JICHU GONGCHENG HUANJING XIAOYING

地基基础工程环境效应

李 飞 郝子进 张亚仿 编 著

卢廷浩 主 审

河海大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地基基础工程环境效应/李飞等编著. —南京: 河海大学出版社, 2003. 11
ISBN 7-5630-1966-9

I. 地... II. 李... III. 地基—基础(工程)—环境效应 IV. TU470

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 098463 号

内 容 提 要

本书以探讨地基基础工程环境效应为宗旨,引证许多实际工程,例举了大量有价值的资料,所提出的一些评价思路、计算方法对于工程技术人员有重要的参考价值。书中提出的“环境效应”问题对工程项目决策者、工程建设者都有警示作用。某些环境问题可以通过工程技术措施解决或部分解决,而有些环境问题则需要有法律手段和规范、规程的约束(书中也部分述及)。本书理论联系实际,确为有价值的工程与环境问题参考书,可读性、可操作性强,可作为工程师们的参考读本,也可作为土木、水利、环境工程等专业高校师生和有关行业管理人员的参考书。

书 名 / 地基基础工程环境效应

书 号 / ISBN 7-5630-1966-9/Tu·62

责任编辑 / 朱 辉

封面设计 / 黄 炜

出 版 / 河海大学出版社

地 址 / 南京西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)3737852(总编室) (025)3722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华书店

印 刷 / 丹阳教育印刷厂

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16 12.25 印张 320 千字

版 次 / 2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1~3000 册

定 价 / 40.00 元

前 言

环境问题是当今世界人类面临的最重要的问题之一。在环境变化的过程中,人类工程活动起了很重要的作用。近十多年来,土木工程师考虑的问题不仅是工程技术本身的问题,许多情况下,还需要考虑以环境为制约的工程条件。在地基基础工程中,固体废弃物地基的利用,污染土地基工程力学性质的变异,化学法加固地基基础的环境效应,地震作用下地基的液化与震陷,动力地基基础振动(交通车辆、施工振动、动力机器等)的环境效应,基坑的开挖与降水,挤土桩施工,强夯法地基处理,地下隧道施工的盾构掘进等都不同程度地对周围环境产生影响。可能导致土体化学污染,地面沉降和地层运动,邻近建筑物倾斜和开裂甚至破坏,还可能引起道路设施,给排水管、煤气管及通风电力电缆等地下管线的断裂和损坏,给工程建设和人民生活及国家财产带来巨大损失并产生不良的社会影响。因此,在确保工程安全的前提下,如何顾及周围土体介质的物理、化学及工程力学环境效应问题,已经成为岩土工程师普遍关注的热点课题。随着我国高层建筑、道路交通、地下工程建设以及城市化进程的加快,各类地基基础工程中的环境效应问题愈来愈突出,相关学科不断交融、新技术不断产生、新材料不断发明、新试验手段不断涌现,也向广大的工程师提出了新的挑战。

本书力求从工程的角度,探讨广大的软土地区地基基础工程中遇到的各种环境问题。以土力学、基础工程学、环境工程学、工程化学、工程机械、工程结构与施工等理论和方法为基础,以近年来国内外正在发展和形成中的环境岩土工程和岩土工程化学等新学科为技术支持,同时融合了新时期地基基础工程施工工艺和积累的最新工程实践经验。

全书由李飞、郝子进、张亚仿编著,由李飞主持编著,卢廷浩主审。本书内容涉及土木工程、环境工程、化学工程、机械工程等众多工程技术领域。主要内容包括:固体废弃物污染土地基、化学加固地基基础、地震作用地基、动力地基基础振动、挤土桩施工、深基坑工程施工、地下隧道盾构法施工等的环境效应问题,还简述了与环境效应有关的软土地基侧向变形的限制(加固)和利用(房屋地基基础纠偏技术)研究专题。书中参考和引用了国内外的有关文献资料,在此,谨向这些文献资料的作者表示衷心的感谢。

限于我们的水平,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2003 年 11 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 地基基础工程环境效应研究的目的和意义	(1)
第二节 地基基础工程环境效应研究的主要内容和若干进展	(1)
第三节 地基基础工程环境效应研究的方法和途径	(4)
第二章 固体废弃物及污染土地基的环境工程特性	(5)
第一节 概述	(5)
第二节 固体废弃物的静力工程特征	(6)
第三节 城市垃圾土的动力特性	(9)
第四节 固体废弃物填埋场的沉降变形特性	(12)
第五节 固体废弃物填埋场沉降估算	(17)
第六节 污染地基土的物理力学性质变化	(21)
第七节 地基土污染和清污机理	(27)
第三章 化学加固地基的环境效应	(31)
第一节 化学加固法在地基处理中的应用	(31)
第二节 化学灌浆的基本物理作用及化学作用	(34)
第三节 化学浆液对粘土渗透性能的影响	(39)
第四节 化学浆材在工程施工和使用期间的环境污染	(41)
第五节 地基基础工程中绿色化学原理及评述	(45)
第四章 地震作用下地基的环境效应	(48)
第一节 抗震地基中的场地问题	(48)
第二节 砂土地基的地震液化	(54)
第三节 地基的震陷	(59)
第四节 地基基础的抗震验算	(66)
第五章 动力地基基础的振动环境效应	(69)
第一节 概述	(69)
第二节 交通车辆运行引起的地面振动分析	(69)
第三节 地基处理引起的地面振动传播	(74)
第四节 施工振动对人体的影响分析	(77)
第五节 施工振动对周围建筑物的影响分析	(81)
第六节 振动对地基土的影响及机器基础的设计步骤	(83)
第七节 强夯振动的监测与分析	(85)
第八节 容许振动限值	(88)
第九节 动力机器隔振与减振措施	(92)
第十节 动力机器基础隔振设计	(95)

第六章 沉桩施工的环境效应	(103)
第一节 概述.....	(103)
第二节 沉桩的振动特性.....	(103)
第三节 沉桩挤土效应理论分析.....	(105)
第四节 减小沉桩环境危害的措施.....	(113)
第五节 现场监测方法及工程实例.....	(114)
第七章 深基坑工程的环境效应	(118)
第一节 概述.....	(118)
第二节 基坑支护结构的破坏形式和基坑稳定性验算.....	(120)
第三节 基坑降水引起的环境效应.....	(124)
第四节 基坑开挖引起地基沉降估算.....	(126)
第五节 减小基坑工程环境效应的措施.....	(130)
第六节 基坑工程相邻环境监测.....	(133)
第七节 基坑工程监测实例.....	(136)
第八章 地下隧道盾构施工的环境效应	(141)
第一节 概述.....	(141)
第二节 盾构施工对土体的影响范围.....	(141)
第三节 盾构施工的变形控制.....	(145)
第四节 盾构施工监测目的和项目.....	(146)
第五节 盾构施工监测方案.....	(147)
第六节 盾构施工监测实例.....	(150)
第九章 软土路基侧向变形影响因素分析与监测技术	(155)
第一节 概述.....	(155)
第二节 软土路基侧向变形的研究方法途径.....	(155)
第三节 软土路基侧向变形影响因素分析.....	(158)
第四节 软土路基侧向变形的监测项目、控制标准及限制方法.....	(162)
第五节 软土路基侧向变形监测简例.....	(164)
第十章 建筑物地基基础的纠偏技术	(166)
第一节 建筑物倾斜原因及纠偏原则.....	(166)
第二节 迫降纠偏法.....	(169)
第三节 顶升纠偏法.....	(178)
参考文献	(185)

第一章 绪 论

第一节 地基基础工程环境效应研究的目的和意义

环境是人类赖以生存和发展的基础。人类是环境的产物,又是环境的改造者。然而,人类由于认识能力和科学技术水平的限制,在改造环境的过程中,往往造成对周围环境的污染和破坏。国务院常务委员会于1998年11月18日通过并公布的《建设项目环境保护管理条例》中明确规定,对环境有影响的建设项目需要配套建设保护环境设施。

任何土木工程项目(包括建筑物和构筑物)都建造在地层上。建(构)筑物在地面以下并将上部荷载传至地基的构件或结构,就是基础。基础的作用是将上部结构荷载传递给其下的地基。所谓地基是指受到建筑物荷载影响的那部分地层。因此,地基基础工程是各种土建项目不可分割的组成部分(见图1-1)。

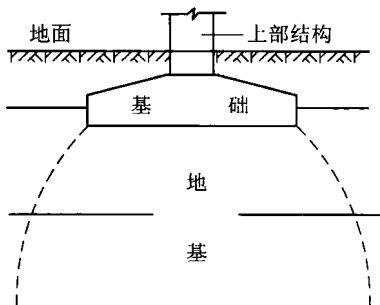


图1-1 地基及基础示意

近十多年来,随着我国高层建筑、地铁车站与区间隧道、高速公路等工程的建设以及城市化进程的加快,各类地基基础工程中引起的环境效应问题愈来愈突出,有些甚至成为该建设项目能否获得批准和建设过程能否顺利进行的关键因素。在地基基础工程中,如固体废弃物地基的利用与污染,化学法加固软土地基后土体的物理、化学及工程力学性质的变异,地震作用下地基的液化与震陷,动力地基基础产生的振动,挤土桩施工引起的地基及地层变化,深基坑开挖与降水,地下隧道工程施工等,都可能导致邻近建筑物倾斜、开裂甚至破坏,还可能引起道路设施、给排水管、煤气管及通风电信电力电缆等地下管线的断裂和损坏,给工程建设和人民生活及国家财产带来巨大损失并产生不良社会影响。因此,研究地基基础工程环境效应,已经成为土木工程师、环境工程师、化学工程师以及机械工程师们普遍关注的热点课题,具有重大的经济效益和社会效应。

第二节 地基基础工程环境效应研究的主要内容和若干进展

一、地基基础工程中的环境化学效应

(一) 固体废弃物及污染土地基的环境效应

面广量大的城市生活垃圾和各种工业固体废弃物填埋在城市周围,已成为严重的环境问题。如何对废旧填埋场进行再利用,一方面需研究固体废弃物及垃圾土的静力、动力工程

及沉降与稳定性工程特性;另一方面还要研究被污染土地基的工程力学特性变异及清污机理等问题。20 世纪 80~90 年代国外学者做了大量试验研究,国内同济大学、河海大学等也进行了有关课题的研究。

(二) 化学加固地基基础的环境效应

近年来化学加固法在软土地基处理中应用较普遍,我们既要研究各种化学加固机理及物理、化学力学性质变化;更要关心有关化学浆材在施工和工程使用期间可能产生的环境污染问题。我国学者熊厚金、林天键等编著的《岩土工程化学》一书,系统地总结了这方面的最新研究成果。

二、地震作用下地基及动力地基基础振动的环境效应

(一) 地震作用下地基的液化与震陷

我国是一个多地震的国家,地震区域的分布相当广泛。强烈的地震会导致房屋、工业厂房与设备、城市建设、交通运输、水电设施等的极大破坏。因此必需研究场地的地震效应、砂土地基液化的评价、软土地基的震陷等地震造成的环境效应问题,提出减轻地基液化和震陷的设计与施工加固措施。

(二) 动力地基基础的振动效应

机动车辆、强夯地基处理、动力打桩及动力机器地基基础等人类活动引起的振动,对人们的生产和生活环境产生了不可忽视的影响。因此,应研究上述振动在地基基础中的传播特点及对人体与建筑物的影响,提出振动控制标准及减振、隔振的设计要求和工程措施。

三、几种典型的地基基础工程施工的环境效应

(一) 挤土桩施工的环境效应

挤土桩对周围土层产生的扰动,使土体产生水平和竖向位移,同时引起土层孔隙水压力升高及土体再固结。大量的土体位移常引致邻近建筑物开裂和倾斜、道路路面损坏、水管爆裂、煤气外泄等严重后果。因此,分析沉降挤土效应的有关理论,监控沉桩挤土的危害程度,减小沉桩危害的防护措施等是十分必要的。

(二) 深基坑工程的环境效应

深基坑工程的环境效应表现为:

1. 在基坑开挖过程中,土体中各点的应力状态及应力路径变得较为复杂。图 1-2 为基坑开挖过程中坑壁与坑底的应力变化。基坑开挖扰动可分为两种典型的应力路径区,如图 1-3 所示。

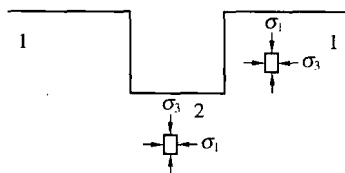


图 1-2 基坑开挖中坑壁与坑底的应力状态

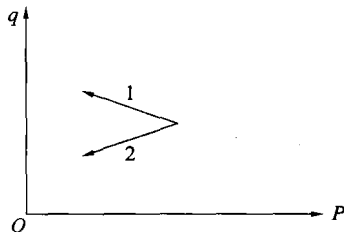


图 1-3 基坑典型应力路径

2. 降低地下水引起的环境效应表现为:(1) 降低地下水位引起的地面沉降;(2) 地下水渗透破坏引起的基坑坍塌;(3) 基坑突涌导致的基土开裂。在基坑的开挖过程中,通常采用井点降水来达到降低地下水位、固结土体、稳定边坡和便于开挖的目的。同时,基坑降水,由于水位降落而引起地面沉降,相应形成以水位漏斗中心为中心的地面沉降变形区,导致此范围内的建筑物、道路、管网等设施因不均匀沉降而发生断裂、倾斜,影响其正常使用和安全。降低地下水引起的环境变化的机理为:1) 水位降低减少了土中地下水对地上建筑物的浮托力,使软弱土层受到压缩而沉降;2) 孔隙水从土中排出,有效应力增加,土体固结变形,本身就是压缩沉降过程;3) 降水过程中,常会随着抽出的水流带走土层中部分细微土粒,引起周围地面沉降。地面沉降量与地下水位降落是对应的,地下水位降落的曲面分布必然引起邻近建筑物的不均匀沉降。当不均匀沉降大到一定程度时,建筑物就会发生开裂、倾斜甚至倒塌现象;4) 基坑开挖时,基坑内、外地下水位存在一定的水位差,在动水压力作用,基坑土会发生流(土)砂、潜蚀现象,导致岩土体结构松动和破坏,引起基坑坍塌。5) 当基坑内、外水位差较大,或基坑下部有承压水存在,开挖基坑使原有土压力减少到一定程度时,承压水的水头压力大于基坑底土体浮重力,形成管涌、流砂现象,造成基土开裂。

3. 支护结构发生变形和位移引起的环境效应表现为:(1) 支护结构自身破坏导致边坡失稳;(2) 支护结构整体破坏导致基坑隆起;(3) 支护结构发生变形和位移引起邻近建筑设施破坏。支护结构发生变形和位移引起的环境效应之机理为:1) 基坑地基土卸载改变坑底原始应力状态,在基坑开挖时,土体中自重压力减少,土体的弹性效应使基坑面产生一定的回弹变形(隆起),坑底表现为弹性隆起,其特征为坑底中部隆起最高,弹性隆起在基坑开挖停止后很快停止,基本不会引起坑外土体向坑内移动;随着开挖深度的增大,坑内外高差所形成的加载和地面各种超载的作用使围护墙外侧土体向坑内移动,使坑底产生向上的塑性变形,其特征为两边大、中间小的隆起状态;2) 在基坑周围产生较大的塑性区并引起地面沉降;3) 基坑底面暴露时间过长,或基坑积水,一方面,使得粘性土吸收体积增大,抗剪强度降低,回弹变形增大。另一方面,由于粘性土的流变性,将增大墙体被动压力区的土体位移和墙外土体向坑内的位移,从而增加地表的沉降。4) 支撑物受破坏或锚杆体系抗拔力不足,拉杆自身断裂或拉杆及锚座的连接不牢等引起支护结构体系承载力丧失,支护结构嵌入深度不足引起基坑隆起并使地基土强度降低或丧失。

因此,需要在保证基坑支护结构自身安全和稳定的前提下,研究基坑开挖与降水造成的地面位移的范围和大小,进行相邻环境的监测并研究减小环境效应的工程措施。

(三) 地下隧道盾构施工的环境效应

盾构施工是在地表下软土层中暗挖隧道的一种现代工程技术。在松软饱和含水不稳定的淤泥质粉质粘土或粘土地层中采用盾构法进行隧道施工,经常会造成隧道上方及其附近地表的不均匀沉降,在建筑物、道路和各种地下管线密集的市区,其危害性就更大,将给工程建设带来巨大损失。因此,研究盾构施工引起周围土体的变形规律及理论分析方法,盾构施工的环境监测及变形控制措施等是非常必要的。

四、其它与地基基础工程环境效应有关的专题研究

(一) 软土路基侧向变形影响因素分析与监测技术

我国沿海地区广泛分布较深厚的海相、滨海相淤泥和淤泥质软土,该地区经济较发达,

近年来兴建了大量的高速公路。如苏北盐城今年同时建设盐通、盐连、盐淮三条高速公路,投资一百五十多亿元。一般路段的长宽比 $L/B \geq 10$, 属于平面应变问题,随着路基内竖向应力、水平应力和剪应力的增加和塑性区的开展,软土路基产生侧向变形并在施工期和运行期长期存在。路基的侧向变形不仅导致竖向沉降并降低路基稳定性,还对邻近建(构)筑物产生水平荷载,水平位移甚至破坏。因此,探讨软土路基侧向变形的研究方法和途径;从室内土工试验,测定反映土体侧向变形的参数;通过现场位移测试,掌握软土路基侧向位移分布规律;采用考虑土体侧向变形的沉降计算理论,分析软土路基的实际沉降;提出适合本地区实际的限制路基侧向变形的地基加固方法,对指导软土地区的道路建设具有现实意义。

(二) 建筑物地基基础的纠偏技术

前述工程建设产生的各种环境效应中,往往包括邻近建筑物的倾斜。同时,建筑物地基基础的纠偏,又可能对邻近建(构)筑物产生新的环境效应问题。建筑物倾斜实质是地基丧失稳定性的反映。因此,研究建筑物倾斜原因及经济合理、安全可靠的地基基础纠偏技术,已成为近年来新的技术热点课题。

第三节 地基基础工程环境效应研究的方法和途径

地基基础工程环境效应研究的内容涉及土木工程、地质工程、环境工程、化学工程、测绘工程、机械工程等众多工程技术领域。它从土建工程建设的角度出发,以土力学、基础工程学、环境工程学、测量学、工程化学、工程机械、工程结构设计施工等理论和方法为基础,以近年来国内外正在发展和形成中的环境岩土工程和岩土工程化学等新学科为技术支持,同时融合了新时期地基基础工程施工工艺和积累的最新工程实践经验,力求探讨广大的软土地区地基基础工程中遇到的各种环境问题。随着我国高层建筑、道路工程、地下工程的建设以及城市化进程的加快,各类地基基础工程中的环境效应问题愈来愈突出。需要相关学科的不断交融,新测试技术的不断产生,新材料的不断发明,新试验手段的不断涌现,从而不仅向岩土工程师,而且向结构、测绘、环境、化学、机械等广大工程师们提出新的挑战。

第二章 固体废弃物及污染土地基的环境工程特性

第一节 概 述

面广量大的垃圾堆放在城市周围,已成为严重的环境问题。由于大多数垃圾和填埋场沥滤液防渗透及处理设施不完善甚至根本没有,已经或即将对场地周围的地表水、地下水和土壤造成难以处置的污染。城市中制造酸碱的工厂、石油化纤厂、煤气工厂、燃料库、污水处理厂及一些轻工业工厂,如印染、造纸、制革等企业均产生大量的废渣、废液等。全国矿区各类固体废弃物累计存放约 70×10^8 t,不仅直接占用和破坏土地 $(1.7 \sim 2.3) \times 10^4$ km² (每年以 200~300 km² 的速度增加);另据不完全统计,我国的生活垃圾年产量以 9% 的速度递增,带来了现实与潜在的污染危害,对周围地基土也造成了不同程度的污染。

污染物通过多种途径进入地基土后不断积累,如果超过土的自净能力,就会引起污染,使地基土的组成、结构和功能发生变化。地基土中污染物主要有无机污染物,如重金属汞、镉、铜、锌、铬等,非金属砷、硒等,放射性元素铯、锶等;还有有机污染物,如酚、氰化物、石油、有机性洗涤剂。此外,城市污水和医院污水中还有一些有害微生物。

地基土被污染时,首先是颗粒间的胶结盐类被溶蚀,胶结强度被破坏,盐类在水作用下溶解流失,土孔隙比和压缩性增大,抗剪强度降低。其次,土颗粒本身腐蚀后,形成的新物质在土的孔隙中产生相变结晶而膨胀,并逐渐溶蚀或分裂碎化成小颗粒,新生成含结晶水的盐类,在干燥条件下,体积增大而膨胀,浸水收缩,经反复交替作用,土质受到破坏。再次,地基土遇到酸碱等腐蚀性物质,与土中的盐类形成离子交换,从而改变土的性质。建筑物地基土经腐蚀后就会出现地基变形:一是土壤结构破坏,造成地基沉陷变形,如腐蚀的产物为易溶盐,在地下水中流失或使土变成稀泥。如某工厂建厂前地下水的 pH 值为 6~7,数年后 pH 值降低到 3,由于土粒结构破坏,变得疏松多孔,使地基产生不均匀变形,造成其软化装置倾斜;二是土壤腐蚀后的生成物具有结晶膨胀性质,如氢氧化钠,生石灰等埋入地基内,将引起地基土膨胀。

据粗略估计,我国卫生填埋所需的土地面积至少为几千万 m² 以上。这些填埋场大多数建设在城市近郊,很有利用的价值,如何对废旧填埋场进行再利用,已经成为人们关注的问题。废旧填埋场的再利用包括两个方面:一是在原有的老填埋场上继续填埋生活垃圾,从而节省建设新填埋场所需的大量资金;二是对已稳定填埋场进行安全处理后,用于修建公园、种植经济树木或建造构筑物等。此外,我国许多城市废弃物填埋场是山谷型的,填埋场的稳定问题显得极为重要,一旦发生失稳破坏,后果将不堪设想,进行补救不仅困难,且需耗费巨资。因此,垃圾土的工程特性、填埋场的稳定、污染地基土的物理力学性质变异及清污机理等问题,已成为地基基础工程环境效应研究的重要方面。

第二节 固体废弃物的静力工程特征

像土一样,城市固体废弃物的强度也随法向荷载的增加而增大。可是,由于城市固体废弃物有机质含量高并具纤维形态,其性状不像典型的土,反而更接近于纤维质的泥炭。影响城市固体废弃物强度特性的因素有以下方面:一是有机质和纤维素含量;二是废弃物的年龄和分解程度;三是填埋年代(指不同年代填埋场的组成成分、压实方式和每日覆盖土的数量等)。同时,城市固体废弃物的强度也是剪切方向的函数,在直剪试验中,当剪切方向与废弃物堆填层面平行时,抗剪强度值最小。

国外研究认为,城市固体废弃物的强度特征主要是摩擦,但对于废弃物的凝聚特征也应引起足够的重视(他们认为这或许不是“真正的”凝聚力,而是因废弃物颗粒的交叠或咬合作用引起的)。因此,在城市固体废弃物的抗剪强度计算中包括一个凝聚力分量也是合理的。这一观点可以通过在填埋场中已观察到很高的竖直切面仍能保持长期稳定这一事实得到有力支持。

估算城市固体废弃物的强度目前有三种途径:一是在实验室或现场直接测试;二是通过破坏实例或荷载试验资料进行反算;三是间接的现场测试。室内试验包括重塑试样或完全扰动试样的直剪试验,用薄壁取土器或冲击式取土器取样做三轴试验以及取出试样的无侧限抗压或拉伸试验等。

用大直剪试验做出的结果见图 2-1 和图 2-2。对自然状态和干燥状态下废弃物的检验表明,它们均具有粒状和纤维状的特征。因此,在大型直剪试验中,和粒状土一样,当然能得到摩擦参数,从图 2-1 和 2-2 可以看出。其内摩擦角 ϕ 约在 $24^\circ \sim 41^\circ$ 之间。但从图上也可以看出,这些材料也存在有一个 $0 \sim 23 \text{ kPa}$ 的凝聚力参数 c 。

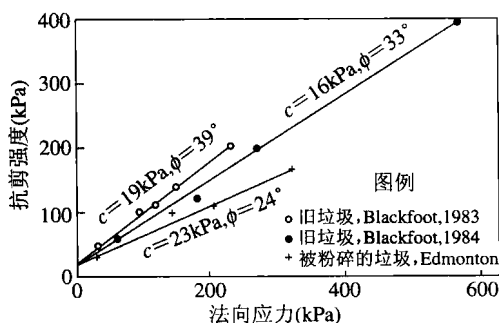


图 2-1 大直剪试验结果(1)

(图中英文为试样产地, Landva & Clark, 1990)

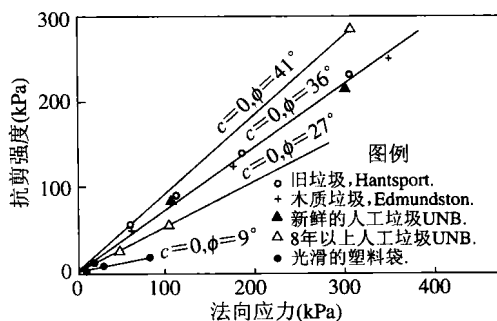


图 2-2 大直剪试验结果(2)

(图中英文为试样产地, Landva & Clark, 1990)

由破坏面或荷载试验结果反算强度参数的方法在很多文献中都提到过。美国很多填埋场在进行边坡稳定分析时都采用了根据加州 Monterey Park 填埋场现场荷载试验得出的抗剪强度参数。别的资料也可以以新泽西州 Global 填埋场的破坏面反算出。Singh 及 Murphy 通过观察南加州很多填埋场在地震期间安然无恙的事例,经过反算也求得了有关的强度资料。由于地震后填埋场边坡并未发生破坏,反算凝聚力 c 和内摩擦角 ϕ 时,可假定

边坡的安全系数等于 1.0,这样反算得到的强度是最小的资用强度,因此这种假定是偏于安全的。

通过直接量测(如直剪试验)得到的强度数据,可用抗剪强度和法向应力的关系加以描述,如图 2-1、2-2 所示。而由破坏面或荷载试验反算而得的抗剪强度常为同时满足平衡方程的两个解,即凝聚力 c 和内摩擦角 ϕ 。这是利用已知条件(安全系数=1.0)去确定两个未知量 c 和 ϕ 的结果。Singh 及 Murphy 根据室内及现场试验以及通过反算得到的强度资料,以 c 及 ϕ 作为坐标归纳于一张图中,即图 2-3,图中阴影部分为他们所建议的可在稳定分析中使用的强度参数范围。

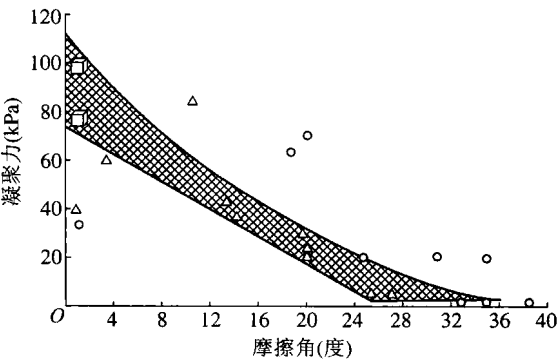


图 2-3 城市固体废弃物强度资料的归纳
(Singh & Murbhy,1990)

在对城市固体废弃物抗剪强度进行评价时,Kavazan-jian 等认为,用以进行极限平衡分析的强度参数,还必须考虑废弃物的压缩和应变协调等因素。他们对城市固体废弃物抗剪强度的评价,主要是根据实例反算和现场试验得出的结果,除了由大直剪试验得出的一组数据外,其它室内试验得出的抗剪强度资料均未采用。因为室内试验的废弃物试样是经过重塑的,同时尺寸又太小,它们不能和城市固体废弃物填埋场的不均匀性相适应,因此,这些试验数据是不可靠的。

被认为是可靠的并可用于废弃物抗剪强度校核的野外和室内试验数据被归纳于表 2-1 中。

表 2-1 可用于城市固体废弃物抗剪强度校核的数据(Kavaganjian 等,1995)

参考文献	资料取得方式	结 果	说 明
Pagotto 及 Rimoldi (1987)	由荷载板试验反算	$\phi = 22^\circ$ $c = 29 \text{ kPa}$	无关于废弃物类型和 试验步骤的资料
Landva 及 Clark (1990)	实验室直剪试验	$\phi = 24^\circ, c = 22 \text{ kPa}$ 至 $\phi = 39^\circ, c = 19 \text{ kPa}$	正应力在 480 kPa 以下, 相应于被粉碎的垃圾, 低强度在图 2-3 中未采用 法向应力 14~38 kPa 废弃物
Richardson 及 Reynolds(1991)	现场大直剪试验	$\phi = 18^\circ \sim 43^\circ$ $c = 10 \text{ kPa}$	和覆盖土的重力密度按 15 kN/m ³ 计算。

表 2-1 中的数据可用对已知稳定的现有废弃物填埋场进行反分析后求得的数据加以补充。表 2-2 给出了对四个现有填埋场进行反算求得的废弃物抗剪强度。反算时假定凝聚力 $c = 5 \text{ kPa}$, 用简化毕肖普法进行计算。这四个填埋场已建成 18 年, 并未产生过大的变形或有其它不稳定迹象, 其稳定安全系数显然比 1.0 大得多甚至可能大于 1.3, 即使在其废弃物抗剪强度计算中采用 1.2 的安全系数, 还是偏于安全的。

表 2-2 现有填埋场边坡反算结果(Kavazanjian 等, 1995)

填埋场	平均边坡		最陡边坡		废弃物强度		
	高(m)	坡比	高(m)	坡比	$F_s = 1.0$	$F_s = 1.1$	$F_s = 1.2$
Lopez Canyon, CA	120	1 : 2.5	35	1 : 1.7	25	27	29
OII, CA	75	1 : 2	20	1 : 1.6	28	30	34
Babyion, NY	30	1 : 1.9	10	1 : 1.25	30	34	38
Private, OH	40	1 : 2	10	1 : 1.2	30	34	37

注: F_s 为安全系数, 假定 $c = 5 \text{ kPa}$ 。

表 2-1 及 2-2 中的抗剪强度与法向应力的关系如图 2-4 所示, 结合观察到已使用的填埋场废弃物中挖一直立壁面达 6 m 的深沟, 其沟壁仍能保持稳定这一事实, 说明固体废弃物的抗剪强度包线具有双线性性质。根据上述观察和图 2-4 中的数据, Karazanjion 等(1995)在填埋场城市固体废弃物的稳定分析中提出了一条折线形的摩尔-库伦强度包线, 当法向应力低于 30 kPa 时, 取 $c = 24 \text{ kPa}$, $\phi = 0^\circ$; 当法向应力大于 30 kPa 时, 则取 $c = 0$, $\phi = 33^\circ$ 。

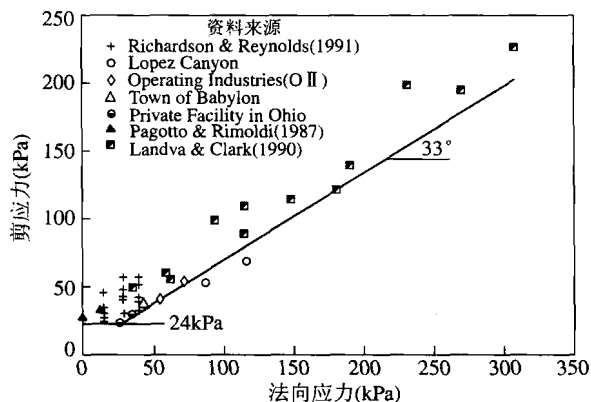


图 2-4 固体废弃物的抗剪强度
(Kavazanjian 等, 1995)

对于长期稳定分析, 抗剪强度参数的变化主要决定于有关的填埋废弃物特性。对卫生填埋场的垃圾种类来说, 并无直接的证据表明其抗剪强度会随时间发生重大变化。如果废弃物内因较多的局部分解而留下软弱带或空穴, 其整体抗剪强度当然要减小, 但这种强度衰减很难通过室内剪切试验被察觉出来。

一方面, 城市固体废弃物像土一样, 其强度随法向应力(或侧限压力)的增加而增大; 另一方面, 由于有机质和纤维素的高含量, 使它的性状不像无机土而更接近于富含纤维的泥炭。城市固体废弃物的纤维素含量可以保持不变, 但易腐烂的有机质含量却随时间而减少, 因此其岩土工程性质随时间推移产生一些变化也是可以想像的。另外, 城市固体废弃物可能非常不均匀, 因此在某一个部位所取的试样并不能充分代表它的“平均”性能。

废弃物的填埋年代也是一个影响因素。例如, 自 20 世纪 60 年代始, 用于包装的塑料制品数量猛增, Landva 及 Clark 注意到塑料袋间的摩擦角仅为 9° 。但废物流中的塑料制品并未使城市固体废弃物的平均单位体积强度降至 9° 。Landva 及 Clark 曾测出一塑料含量极

高的破碎废弃物的内摩擦角为 24° (见图 2-1)。

到了 20 世纪 90 年代,城市固体废弃物的性状又和以前不同,可利用的填埋空间变得愈来愈珍贵,增加废弃物的压实度被看作是在同一空间内填埋更多废弃物的主要途径。另外,更加密实的每日覆盖土也使填埋物的平均密度增加。但层状废弃物和每日覆盖土的密度增加,是否会使其强度相应增加,这一点还不很清楚。增加废弃物的重复利用对其组成和强度有多大影响也是个未知数。

也许有关城市固体废弃物强度确定的最大问题与其基本原理有关。那就是莫尔-库伦理论是否同样适用于废弃物? 由于城市固体废弃物可产生很大的变形而不破坏,应取对应多大应变时的剪应力作为强度值才合适呢? Singht 和 Murphy 用谢尔贝薄壁取土器取样做过城市固体废弃物的三轴压缩试验,在应变达到 30% 以后,应力仍在持续增长,并无达到一稳定值的迹象。在美国加州 Monterey Park 进行荷载试验中,一超载的填埋物边坡产生了很大的变形,但仍无明显的破坏面。根据以上事实和其他资料, Singh 和 Murphy 断定,用莫尔-库伦理论来描述固体废弃物的强度特征可能是不合适的。

填埋场稳定破坏常发生于衬垫系统内的接触面或下卧软土层中。因此,当进行稳定分析必须估计废弃物的强度特性时,和应考虑不同材料的应变协调性一样,正确计算软弱接触面和不良地基的强度特性是更为重要的。

第三节 城市垃圾土的动力特性

一、试验方法

试验所用的城市垃圾土试样取自德国 Hanover 垃圾填埋场地中心的钻探孔,该垃圾土的主要组成材料如表 2-3 所示。

表 2-3 某城市垃圾土的组成

垃圾土的组成	占总重量的百分比(%)	垃圾土的组成	占总重量的百分比(%)
木 材	3.0	纺织材料	2.4
金 属	3.6	纸张和硬纸板	24.1
塑料和包装材料	14.1	其余物质(土)	52.8

试验中采用重塑试样,并在现场取来的垃圾土中加入 5% 塑料颗粒(粒径 < 31.5 mm),最后得到的重塑垃圾土试样的颗分曲线如图 2-5 所示。固结后的各垃圾土试样的重度范围为 $9.5 \sim 10.9$ kN/m³,固结后各垃圾土试样的含水量范围为 20.5%~30.0%。

试验在德国波鸿大学的循环三轴仪上进行,三轴试样直径为 100 mm。共进行了四组循环三轴排水试验(表 2-4)。试验中对试样分别施加两种不同荷载,一种为循环压缩,另一种

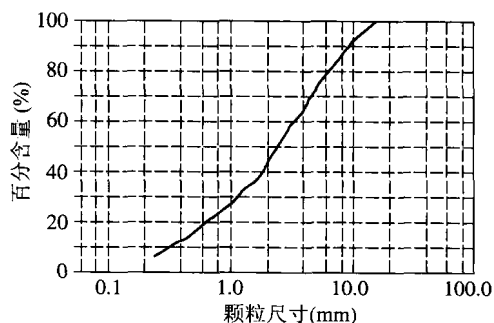


图 2-5 重塑垃圾土试样的颗分曲线

为循环压缩和伸长,分别模拟交通荷载和地震荷载情况。循环荷载频率为 1 Hz,固结压力分别为 200 kN 和 100 kN。

表 2-4 试验加载情况

试验序号	固结压力(kN/m ²)	循环荷载应力(kN/m ²)	循环周数
1	200	25,50,75,100	25
2	200	±25,±50,±75,±100	25
3	200	±100	1 000
4	100	±50	1 000

二、动压缩模量

图 2-6 上示有第 2 组试验重塑垃圾土的动压缩模量 E 随循环荷载周数 N_{cvc} 变化的曲线。可以看出,重塑垃圾土的动压缩模量值随着循环轴向应力 σ_a 和循环轴向周数的增加而降低。

图 2-7 为第 3 和第 4 组试验重塑垃圾土在不同固结压力下的动压缩模量随循环荷载周数变化的归一化曲线,可见动压缩模量可用固结压力归一。当振动周数少于 50 周时,动压缩模量随循环周数的增加而降低;而当振动周数大于 50 周时,动压缩模量随循环周数的增加略有增大。但随着振动周数的变化,动压缩模量降低或增大有限。

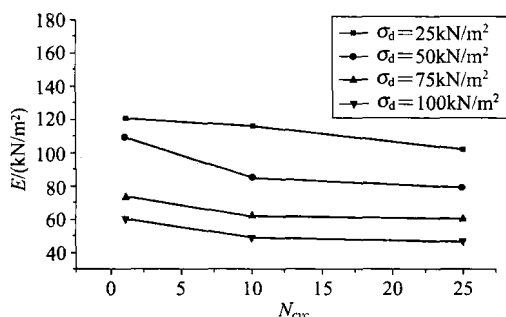


图 2-6 动压缩模量变化曲线(第 2 组试验)

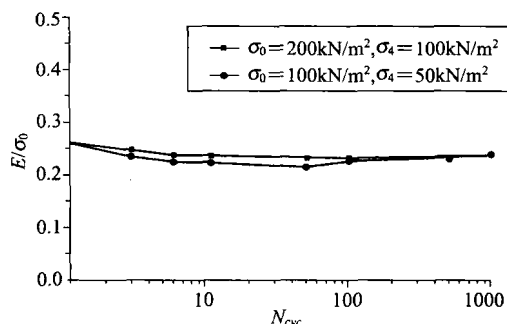


图 2-7 动压缩模量变化曲线(第 3、4 组试验)

图 2-8 为第 2、第 3 和第 4 组循环压缩和伸长试验,重塑垃圾土在不同固结压力、不同循环应力和不同循环周数下的动压缩模量随轴向动应变 ϵ_a 变化的归一化曲线,该曲线可用下式表示:

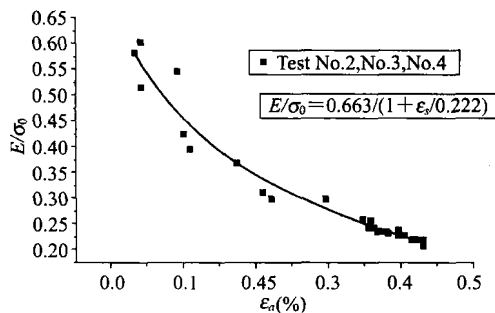


图 2-8 动压缩模量随轴向动应变变化的归一化曲线(第 2、3 和 4 组试验)

$$E/\sigma_0 = 0.663/(1 + \epsilon_a/0.222) \quad (2-1)$$

式(2-1)中只有两个计算参数,便于实际应用。

三、轴向残余应变

图 2-9 为第 1 组试验重塑垃圾土在不同循环压缩荷载下的轴向残余应变随循环荷载周数变化曲线,其表达式为(见图 2-10 和图 2-11):

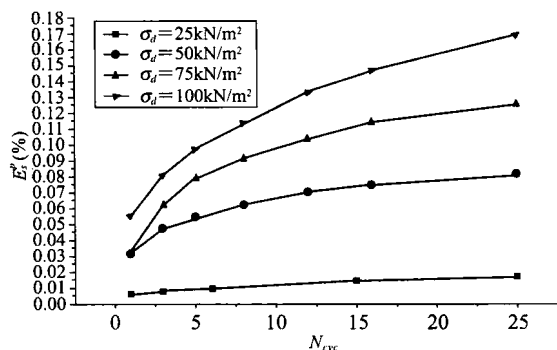


图 2-9 轴向残余应变与循环周数关系曲线(第 1 组试验)

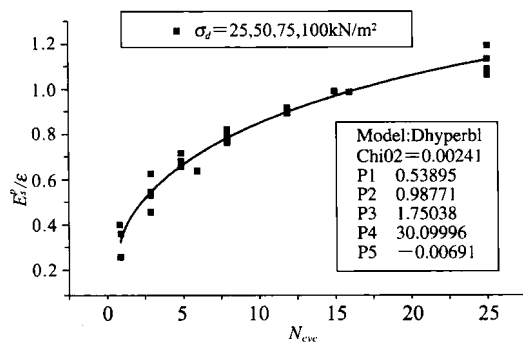


图 2-10 轴向残余应变比循环周数关系曲线(第 1 组试验)

$$\frac{\epsilon_a^p}{\epsilon_{a,n=15}^p} = \frac{a_1 N_{cyc}}{a_2 + N_{cyc}} + \frac{a_3 N_{cyc}}{a_4 + N_{cyc}} + a_5 N_{cyc} \quad (2-2)$$

$$\epsilon_{a,n=15}^p = -0.0347 + 0.480 \frac{\sigma_d}{\sigma_0} \quad (2-3)$$

式中, $a_1 = 0.539$, $a_2 = 0.988$, $a_3 = 1.750$, $a_4 = 30.1$, $a_5 = -0.00691$ 。当采用非线性动力有限元计算分析垃圾堆场在交通荷载作用下的动力反应时,式 2-2 和式 2-3 可用来计算垃圾堆场的振陷。

对于第 2 组试验,重塑垃圾土在不同循环应力下的体积残余应变与循环周数的关系可用下式表示(见图 2-12 和图 2-13):

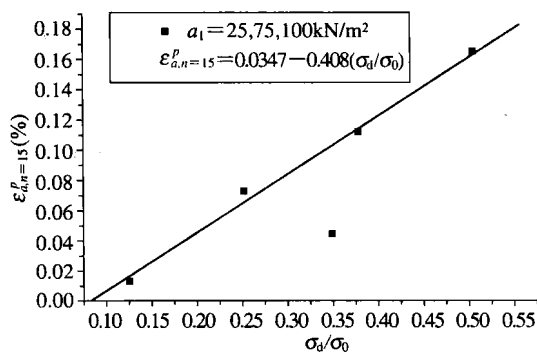


图 2-11 轴向残余应变与循环轴向应力比关系曲线(第 1 组试验)

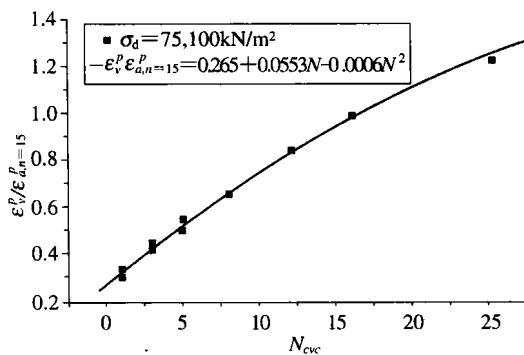


图 2-12 体积残余应变与循环周数关系曲线(第 2 组试验)