

软土地区取土扰动理论 及试验研究

吴跃东 著



科学出版社

软土地区取土扰动理论 及试验研究

吴跃东 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对软土地区取土过程中的扰动理论、数值模拟及室内取土试验进行了系统研究, 主要内容包括取土贯入引起扰动的理论分析, 通过取土贯入过程的数值模拟对取土器参数影响进行分析, 并对国内常用的薄壁取土器进行改进; 通过粒子图像测试法(PIV)技术, 研究了半模取土器在贯入过程中引起的土体二维变形及表面三维变形特性; 基于透明土的取土器贯入试验对土体扰动变形影响因素进行分析, 以及土样质量评价及减少扰动措施等。许多研究成果来自室内试验的总结和分析, 部分研究成果(如改进的薄壁取土器)已经在南京和天津等地区的软土取样中得到应用, 试验结果表明可以提高原状取土质量。

本书可供岩土工程、地质工程等领域的科研工作者及设计勘察施工技术人员参考, 也可作为高等院校工程地质、岩土工程、土木工程专业的研究生和本科生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

软土地区取土扰动理论及试验研究/吴跃东著. —北京: 科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046274-9

I. ①软… II. ①吴… III. ①软土地区—土工试验—研究 IV. ①TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 268507 号

责任编辑: 惠 雪 / 责任校对: 李 影

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 11

字数: 222 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

自我国改革开放以来,政府对基础产业和基础设施建设投资大幅增长,而在沿海地区工程建设中普遍会遇到软土问题。由于软土是一种特殊性土,具有强度低、压缩性高、渗透性低、固结变形时间长等特点,因此,在软土地基上修建筑物,地基的变形和强度问题就显得尤为突出。设计人员对地基变形和稳定的计算要求也在不断提高,在解决实际工程问题时,例如确定土坡稳定、地基承载力、建筑物沉降和挡土墙土压力等,一般都采用不扰动土样在某种室内试验中测定的强度或压缩性指标来进行计算。在目前的不扰动土样土工试验中,无侧限抗压强度 q_u 的离散性(标准差)达到 10kPa 左右是具有普遍性的。这样的离散性对土坡圆弧滑动的安全系数的影响大概为 20%,而折合到具体建(构)筑物工程费用则达到总工程费用的 30%;而相应的其他费用,包括取土、试验在内的地基勘探等,一般最多占总工程费用的 1%~2%,在某些大型工程中甚至仅占 0.1%左右。因此,在软土地基上修建筑物,如果仅用总工程费的 1%的费用来改进取土技术,且能够将土的力学性质指标试验精度提高到 10%左右,那是相当合算的。原状取样是工程勘察中的一项最为基础性的工作,取样的质量直接影响到工程地质的评价和岩土工程的设计与施工。但是目前国内有些勘察部门、试验人员以及使用试验结果的设计人员对此重视不够,加上勘察工作的市场化,过分强调勘探工作本身的经济效益或效率,使得取土质量和技术发展水平之间发生了严重的脱节现象,特别是在目前普遍存在忽视土样质量的情况下,取得高质量的不扰动土样是十分必要的。因此,对软土地区取土扰动理论和高质量取土技术研究具有突出的学术价值和实践价值。

本书共分 7 章。第 1 章介绍了软土地区原状土取土扰动理论及技术研究现状;第 2 章基于球孔扩张法,考虑地表为自由边界这一实际情况,在半无限空间球孔扩张变形和应变解析解的基础上,推导了取土管贯入土体过程中产生的应变解,并分析了取土管贯入土体产生扰动的影响因素;第 3 章通过有限元数值模拟取土过程中取土管对周围土体的扰动情况,分析不同参数对取土管中心线上土体应变的影响;第 4 章介绍了薄壁取土器的设计改进及取土试验注意事项;第 5 章基于室内试验及粒子图像测速法 (PIV) 技术,研究了半模取土器在贯入过程中不同试验条件下(取土器壁厚、直径、压实度、饱和度、土体类别等参数)引起的土体二维变形及表面三维变形规律;第 6 章采用人工合成透明土材料作为土体介质,以有机玻璃管模拟取土器,研究了取土器贯入过程中的土体变形规律;第 7 章介绍了取样扰动土样质量评价体系及减少扰动措施。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金“软土地区取土扰动理论分析及高质量取土试验研究”(项目编号: 51279049)、重大基础设施安全保障协同创新中心发展基金和中央高校科研业务费“岩土体基本特性与新试验、计算方法研究”(项目编号: 2015B06014) 等项目的资助。本书的出版工作还得到河海大学重点学科建设和江苏省优势学科平台建设经费的资助, 在研究过程中得到了河海大学堤坝工程与岩土力学教育部重点实验室和江苏省岩土工程技术工程中心在试验平台试验上的大力支持。本书内容是在左文荣、谢伟、罗如平等研究生的硕士学位论文和中国能源建设集团江苏省电力设计有限公司、中国电力工程顾问集团华北电力设计有限公司科技项目《软土地区高质量连续取土技术研究》的基础上完成。本人的研究生罗如平、杨冬、刘坚、刁红国等在本书撰写和修订过程中付出了辛勤劳动, 再次表示感谢。同时向为该书撰写和出版提供资助和帮助的单位及人员表示衷心的感谢, 并祝愿我的研究团队和研究生群体在以后取得更多的成果。

由于笔者水平有限, 书中一定存在不少谬误和遗漏之处, 恳请读者不吝赐教, 以利于笔者提高。欢迎国内外同行与笔者共同探讨, 为我国软土地区原状取样技术研究及工程建设做出更大贡献。

吴跃东

2015 年秋于清凉山校区

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 原状取土研究现状	2
1.1.1 产生扰动的因素	2
1.1.2 取土器的使用现状	3
1.1.3 取土器贯入扰动理论研究	3
1.1.4 有限元法	6
1.2 软黏土取土对周围土体的扰动影响	7
1.2.1 取土技术发展概况	7
1.2.2 取土器的基本技术参数	9
1.2.3 取土方法	11
1.2.4 土样扰动程度的评价方法	12
1.2.5 减小土样扰动影响的室内试验方法	13
参考文献	14
第 2 章 取土贯入引起扰动的理论分析	17
2.1 半无限土体球孔扩张引起的位移解	18
2.1.1 基本假定	18
2.1.2 求解思路	18
2.1.3 模型建立及求解过程	18
2.1.4 位移场表达式	19
2.2 取土器贯入土体引起的应变解	20
2.2.1 基本假定	20
2.2.2 求解思路	20
2.2.3 模型建立及求解过程	20
2.3 取土器贯入土体扰动分析	25
2.3.1 扰动分析的理论方法比较	25
2.3.2 中心线上土体单元应变变化分析	25
2.3.3 中心线上土体单元竖直应变影响因素分析	27
参考文献	28

第 3 章 取土贯入的数值模拟及参数分析	29
3.1 有限元分析取土贯入过程的主要问题	29
3.1.1 变形问题和非线性问题	29
3.1.2 接触问题	30
3.1.3 本构关系问题	32
3.1.4 荷载施加问题	33
3.2 取土贯入过程的数值模拟分析	34
3.2.1 基本假设与计算简图	34
3.2.2 模拟结果分析	34
3.3 取土器参数影响分析	39
3.3.1 径厚比 D/t 和面积比 C_a 与轴线上最大压缩应变的关系	39
3.3.2 刃角与轴线上最大压缩应变的关系	41
3.3.3 摩擦系数与轴线上最大压缩应变的关系	41
参考文献	42
第 4 章 取土器改进设计及试验注意事项	43
4.1 取土器的改进	45
4.1.1 取土器参数影响	45
4.1.2 取土器改进方案	46
4.1.3 改进设计评价	49
4.2 取土及试验注意事项	52
4.2.1 取样时的注意事项	52
4.2.2 制样时的注意事项	54
4.2.3 试验时的注意事项	56
参考文献	57
第 5 章 取土器贯入引起的土体变形试验研究	58
5.1 粒子图像技术研究现状	58
5.1.1 粒子图像测速技术	58
5.1.2 基本原理	58
5.1.3 粒子图像技术在岩土工程中的应用	59
5.2 试验装置及试验方案	60
5.2.1 试验装置	60
5.2.2 半模取土器贯入试验方案	62
5.3 干砂状态下土体扰动变形分析	63
5.3.1 标准砂基本特性	63
5.3.2 螺距标定试验	64

5.3.3	像素标定试验	66
5.3.4	土体变形矢量分析	68
5.3.5	土体剪应变分析	73
5.3.6	取土器轴线处土体变形分析	80
5.3.7	土体扰动变形影响因素分析	85
5.3.8	横截面上土体变形规律分析	89
5.3.9	内衬材料对轴线处土体变形的影响	90
5.4	饱和砂状态下土体扰动变形分析	92
5.4.1	像素标定试验分析	93
5.4.2	土体变形矢量分析	94
5.4.3	土体剪应变分析	96
5.4.4	取土器轴线处土体变形分析	99
5.5	黏土状态下土体扰动变形分析	102
5.5.1	试验土样	102
5.5.2	土样液塑限试验	103
5.5.3	土样击实试验	103
5.5.4	重塑土样制备	104
5.5.5	像素标定试验	106
5.5.6	土体扰动变形分析	106
5.5.7	土体剪应变分析	109
5.6	取土器贯入土体表面三维变形试验研究	110
5.6.1	PIV 技术三维应用	110
5.6.2	土体三维变形分析流程	111
5.6.3	土体砂三维变形重组与分析	118
	参考文献	119
第 6 章	基于透明土的取土器贯入试验研究	121
6.1	透明土制备基本原理	121
6.2	透明土的制备	122
6.2.1	模拟自然土颗粒材料	122
6.2.2	模拟孔隙流体材料	122
6.2.3	透明土制备过程	123
6.2.4	制样过程中需要注意的问题	125
6.3	激光散斑技术	126
6.4	试验装置及试验方案	127
6.4.1	试验装置	127

6.4.2	试验方案	128
6.5	轴线处土体扰动变形分析	129
6.6	土体扰动变形影响因素分析	132
6.6.1	像素标定试验	132
6.6.2	3 档贯入速率土体扰动变形分析	133
6.6.3	4 档贯入速率土体扰动变形分析	135
6.6.4	取土器内径对扰动变形影响分析	136
6.6.5	贯入速率对扰动变形影响分析	137
	参考文献	138
第 7 章	土样质量评价及减小扰动措施	139
7.1	取土扰动对土样的影响	139
7.1.1	对土样的残余有效应力和饱和度的影响	139
7.1.2	对土样的强度特性的影响	140
7.1.3	对土样固结特性的影响	142
7.2	取土扰动的评价指标	143
7.2.1	取土扰动的现场判别	143
7.2.2	取土扰动的室内评价方法	143
7.3	改进的敞口薄壁取土器	146
7.3.1	背景	146
7.3.2	改进的敞口薄壁取土器	147
7.4	现场取土质量评价	150
7.4.1	盐城电厂扩建工程取土质量分析	151
7.4.2	天津北疆发电厂工程和南京梅山能源工程取土质量评价	154
7.4.3	改进的薄壁取土器取土质量分析	157
7.5	引起土样扰动的原因及预防措施	158
7.5.1	引起土样扰动的因素	158
7.5.2	减小扰动的室内试验方法	159
7.5.3	预防和减小机械扰动的措施	162
	参考文献	164
	索引	165

第1章 绪 论

原状土取样是岩土工程勘察中的一项基础工作,取样的质量直接影响到工程地质评价和岩土工程设计、施工。原状土样质量低劣就不可能正确反映地基土层的真实性状,可能导致对地基的估计过高,使工程设计偏于危险;更多的是导致对土质的评价降低,无形中浪费大量宝贵的建设资金^[1]。我国传统土的试样只分为原状土样和扰动土样两类,原状土样可做各种物理力学性质试验,而扰动土样(一般是保湿土)仅做含水量、液塑限、颗粒分析等试验。实际上绝对的原状土样是不存在的,国际上一般将“能满足所有室内试验要求,能用以近似地测定土的原位强度、固结、渗透以及其他物理性质指标的土样”称为“不扰动土样”^[2]。李广信教授^[3]指出,目前研究土的结构性模型的论文有很多,但是不扰动土样的采取技术方面的工作却非常少,这种情况是不正常的。

在解决实际土工问题时,设计、计算所需土的性质参数的取得方法一般有两种:现场原位测试方法和室内土工试验方法。室内土工试验方法采用在现场取土,将土样带到实验室进行试验,取得相关物理力学参数,然后以这些参数代表原位土的参数进行设计计算。在某种程度上,这些用于试验的土样的性质决定了整个设计的安全性和经济性。因此,判断室内试验测定的参数在何种程度上代表天然土层的性质就显得十分重要。

1932年,Casagrande^[4]发现天然黏土具有复杂的颗粒结构,这种结构受到扰动破坏后在实验室内无法恢复,而且用这种结构受到破坏后的土样测出的力学指标与原位力学指标迥然不同。至此,人们才认识到用原状土测定土的力学性质指标的重要性,不扰动取土技术也因此日益发展起来。

正如1949年Hvorslev^[5]所指出的,要取得完全不扰动的土样是不可能的。因为仅仅由于卸去上覆和周围压力就会不可避免地引起某些扰动。对于附加扰动(多数学者研究认为这是引起扰动的最主要的因素,有时可以使不排水强度降低达90%),尽管可以通过精心操作加以减小,但要减小到可以忽略的地步恐怕也是不现实的。特别是砂性土,即使目前可以采用冻结法取到扰动较小的砂样,但由于该方法成本高,操作复杂,很难在工程中普遍推广。因此对砂土力学参数的测定,主要采用与原位密实度相等的重塑土样进行三轴试验,或采用休止角方法测定内摩擦角。可是许多学者通过对比冻结法取得的原位土样和重塑土样的力学性质后,发现两者存在很大差别,这说明取原状砂性土是非常必要的^[6]。

正因为取原状土存在上述种种问题,有些学者怀疑室内试验的意义,提出用原位测试代替室内试验^[7,8]。但是,由于原位测试本身还存在许多不完善的地方,且除十字板剪切试验外,很多原位测试不能直接得到设计参数,需要利用已有的室内试验将这些原位测试数据与设计所需参数建立关系,即原位测试的使用还是以室内试验为基础,例如,触探试验。实践证明,这的确是一种简易快速的方法,但是该方法还不能直接给出所有设计参数,通常是根据已有室内试验成果利用触探数据提出某些设计参数,即原位测试成果的使用是建立在室内试验的基础上;另外,触探机理问题、不同地区和不同成因土的影响问题以及地基土的承载力深度修正问题等都是非常复杂的问题,有待深入研究^[9]。同室内试验相比,原位测试还存在应力、变形等边界条件不明确的缺点,因此,目前完全抛弃室内试验是不可能的。

1.1 原状取土研究现状

1.1.1 产生扰动的因素

取土引起的扰动会使土样的强度和变形特性发生显著改变^[10]。引起土样扰动的因素错综复杂,许多学者对此进行了大量研究。Matsuo 和 Shogaki^[11], Baligh 等^[12], Shogaki 等^[13] 分析总结了很多扰动因素,涉及取土器类型、钻孔方法、取样方法、土样运输、储存时间和环境、室内开土和试验方法等。

Hvorslev^[5] 认为在取土过程中产生扰动的因素有:含水量和孔隙比的变化、卸荷作用、土体结构的破坏和化学变化等。

魏汝龙和王年香^[14] 认为这些扰动因素可以概括为下述 3 种:

(1) 土样原位应力的释放和重新分布。土样取出后由初始的天然不等向应力状态改变为各向总应力相等,且等于零,土样的平均有效应力大小发生了改变,进而引起土样扰动;仅经历这一扰动作用的土样被称为“理想”土样。

(2) 土体中气体的逸出。上面所叙述的解除应力的一部分变为土中孔隙水的表面张力,这样就使得孔隙水承受负压,所以会有一部分溶解于水中的气体逸出,使土样中的残余有效应力变小,体积有所膨胀,土样产生扰动。

(3) 附加机械扰动。这是最复杂的扰动因素,也是影响最大的因素。自土样从地基中取出到室内试验的各个环节均会受到不同程度的机械扰动作用。机械扰动主要表现在使土样产生变形,从而破坏其天然结构。其中,取土器是决定土样扰动程度的关键因素,但钻孔方法、取土操作、土样的运输和储藏、试验的切削和安装等均会引起土样机械扰动,但是可以通过选用合适的取土器、正确的钻孔和取土方法、精心细致的操作来大大降低。

胡中雄^[15] 总结了引起土样扰动的原因和不同的扰动情况,包括原位应力的卸

除、人工扰动 (包括钻探、取样、运输等)、环境扰动 (储藏条件、实验室的介质和环境、湿度与温度等) 和生物扰动等。

1.1.2 取土器的使用现状

为了尽量减少取样时的扰动对土样的强度和变形特性的影响, 在钻探、取土以及土样的运输、储存和制备试验时, 必须严格遵守有关规范和操作规程。从表 1-1 中可以看出在取土器的类型选用方面, 国内外仍有较大差异。国内大部分勘察部门在取土时常规采用的是内加衬筒的敞口厚壁取土器, 由于该类取土器取得的土样往往扰动很大, 因此, 目前科研机构也在推广应用较好的取土设备, 例如薄壁取土器 (也是属于敞口式取土器) 和自由活塞取土器等。在我国《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 中列为唯一能在软土中取得 I 级土样的固定活塞薄壁取土器, 因其操作较麻烦, 需要用两套钻杆, 效率较低, 每个钻杆台班的进尺不到 10m, 因此在国内极少采用。魏汝龙^[16] 曾将固定活塞薄壁取土器与常规取土器进行对比试验, 结果表明, 采用固定活塞薄壁取土器可使快剪强度提高 40%~60%, 固快指标减少 10%~15%。

表 1-1 国内外常用取土器类型

国家或地区	敞口式取土器		固定活塞式 薄壁取土器	自由活塞式 薄壁取土器	箱式 取土器	组合式取土器 (瑞典标准取土器)
	厚壁	薄壁				
中国	✓	✓	×	△	×	×
美国	×	△	✓	×	△	×
英国	×	✓	✓	×	×	✓
瑞典	×	△	✓	×	✓	✓
东南亚地区	✓	✓	△	△	×	×
挪威	×	×	✓	×	×	×
日本	×	×	✓	×	△	×
意大利	×	✓	✓	×	△	×
法国	×	✓	✓	△	×	×
芬兰	×	×	△	×	×	✓
丹麦	×	✓	△	✓	×	×
加拿大	×	×	✓	✓	△	×
澳大利亚	×	✓	△	△	×	×
以色列	×	×	△	✓	×	×
波兰	×	✓	✓	△	×	△
德国	△	×	✓	△	×	×
俄罗斯	×	✓	×	✓	×	×

1.1.3 取土器贯入扰动理论研究

主要包括应变路径法 (strain path method, SPM) 和圆孔扩张法 (cavity expan-

sion method, CEM)。

1. 应变路径法理论研究

Baligh^[17,18] 根据对原位测试和取土装置的研究于 1985 年首先提出“应变路径法 (SPM)”，此法是 Lambe^[19] 应力路径法的发展。在 Baligh 提出 SPM 后, Houlsby 等^[20]、Teh^[21] 和 Teh 等^[22] 尝试将 SPM 应用到浅基础中, 采用 Mises 屈服准则, 并考虑平衡方程, 用有限差分法分析锥形贯入计贯入问题。Sagaseta^[23] 吸收了 SPM 贯入过程中土体运动形成无旋的速度场的假设, 在点源和流场求解位移场的基础上, 提出源-汇 (source-sink) 法, 将土体不排水贯入过程, 看作一个点源在无限土体中匀速下沉形成柱状孔的过程, 贯入过程会在土体的应力自由边界上产生正应力和剪应力。

应变路径法认为在深层贯入的土体变形计算中, 在不考虑土体本构模型条件下仍然能够保证足够的精度。在均质、各向同性的土体中, 利用一个点源 (source) 和一个均匀的竖直方向的流场相结合模拟贯入过程, 如图 1-1 所示。首先估算速度场, 接着利用流速沿着流线对时间积分得到位移场, 再由几何方程得到应变, 最后由本构模型得到应力。

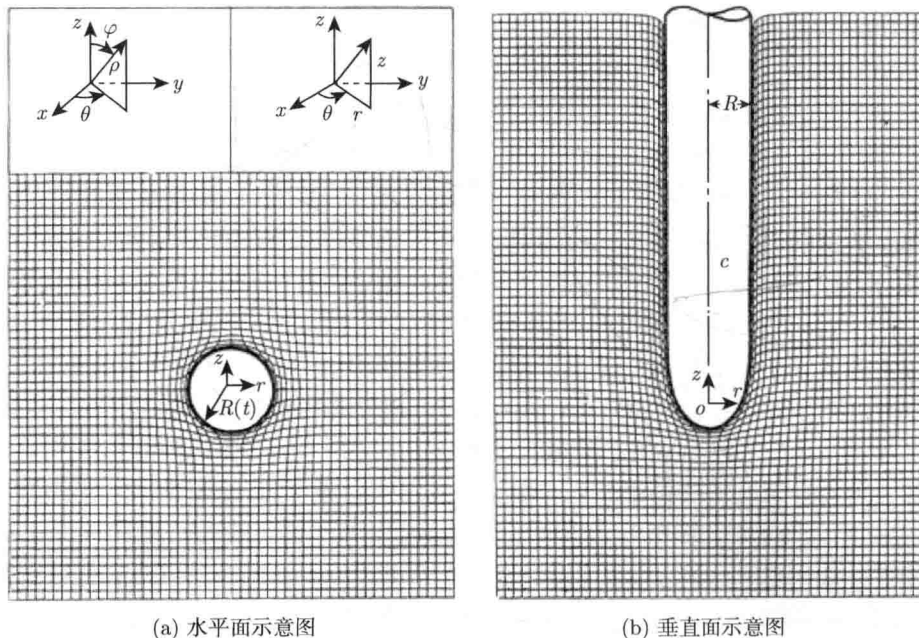


图 1-1 应变路径法示意图 (图片来源: 文献 [17])

如图 1-1 所示, Baligh^[17,18] 提出的应变路径法假设土体中的圆孔径向扩张具

有体积扩张速度 V ，并用流速势函数 ψ^0 表示为

$$\psi^0 = \frac{V}{4\pi} \cos \phi, \quad \phi = \arctan \frac{r}{z} \quad (1-1)$$

则可得土体各点的速度为

$$v_r^0 = \frac{V}{4\pi} \frac{\sin \phi}{\rho^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi^0}{\partial z} \quad (1-2)$$

$$v_z^0 = \frac{V}{4\pi} \frac{\cos \phi}{\rho^2} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi^0}{\partial r} \quad (1-3)$$

式中, V 为体积扩张速度。

在轴向速度上叠加轴向均匀流速 U ，叠加后可得最终的流速势函数为

$$\psi = \psi^0 - \frac{r^2}{2} U \quad (1-4)$$

与基于球对称和平面轴对称的 CEM 相比, SPM 由于叠加了竖向的流场, 因对贯入的模拟更符合实际情况。SPM 基于流速势函数和流线的分析, 可以直接由平衡方程得到土体中的位移分布。

SPM 存在一定的不足, 主要体现在以下几个方面:

(1) 由于采用无限土体的假定, 没有考虑地基土的表面, 即应力自由面, 这与实际情况是不符合的; 此外, 在贯入过程中还会产生地面的隆起。

(2) 由于采用流场来模拟贯入问题, 土体颗粒被假设为与流体相似的无黏性的材料; 而实际上土体与流体之间在性质上有较大的差异, 如黏性、塑性和剪胀性等。此外, SPM 法得到的解中, 有效应力解有可能不满足土体的本构关系, 总应力解可能不满足平衡方程。

(3) 土体中竖向速度上叠加竖向均匀流速 U , 适用于体积不可压缩的流体, 但并不完全符合土体, 因此 SPM 只能近似处理黏土中的不排水贯入问题, 而不能考虑接触摩擦的影响。

2. 圆孔扩张理论研究

1961年, Giboson 和 Anderson^[24]首次将圆柱空腔体扩张法应用于岩土工程。Bishop 等^[25]建议将圆孔扩张极限压力理论用于沉桩挤土性状研究, 随后用来分析桩的承载力、旁压试验、静力触探等土工问题, 并在岩土工程领域得到广泛的应用。Butterfield 和 Banerjee^[26]首次将平面应变条件下的柱形孔扩张理论用来解决桩体贯入问题; Randolph 等^[27]用圆孔扩张理论结合有限元分析了黏土中沉桩产生的应力及随后的固结; Cao 等^[28,29]采用圆孔扩张理论, 并结合修正剑桥模型分析了旁压试验、静力触探等土工原位测试问题。

传统的圆孔扩张理论是在研究金属压痕问题时提出的, 它将孔周金属分为塑性区、弹性区 2 个区域。而在岩土工程中, 由于土的剪胀、软化等特性以及在土孔扩张过程中孔侧土所受到的径向挤压力很大, 其附近土体已经达到破坏, 故实际应将土体分为 3 个区域: 破坏区、屈服区 (塑性区)、弹性区^[30]。

圆孔扩张理论的共同假设条件为: ①土体是连续、均匀且各向同性材料; ②土体内具有均布的初始应力。

现有很多的 CEM 的模型, 总体上可以分为以下 3 种: ①线性或非线弹性模型; ②弹塑性模型包括理想弹塑性模型、应变硬化模型和应变软化模型; ③黏弹性模型和黏弹塑性模型。

图 1-2 为圆孔扩张的力学模型示意图。设空心球壳 (球孔扩张) 或圆柱筒 (柱孔扩张) 区域的初始内径和外径分别为 a_0 、 b_0 , 初始应力为 p_0 , 当半径为 a_0 的孔壁上, 法向压力由初始压力 p_0 增大到 p 时, 此时研究区域的塑性区半径为 c , 内径和外径分别变为 a 、 b , 则把此过程称为圆孔扩张。

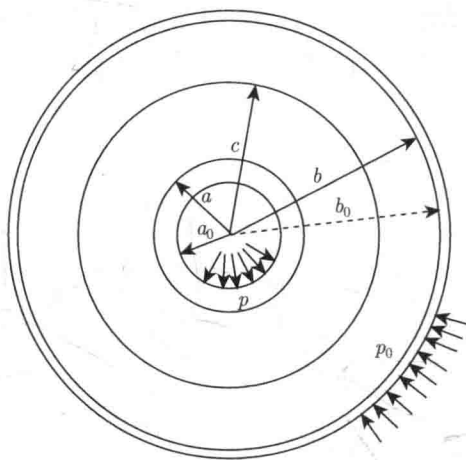


图 1-2 圆孔扩张的力学模型示意图

当 $b_0 \rightarrow \infty$ 时, 即表示无限土体中初始半径为 a_0 的小孔扩张问题。

根据力学模型的边界条件, 上述 3 种 CEM 模型都可以分为:

- (1) $a_0 > 0$, $b_0 < M (M < \infty)$, 适用于非无穷介质中, 如在预钻孔中沉桩;
- (2) $a_0 > 0$, $b_0 \rightarrow \infty$, 适用于无穷介质, 为部分挤土;
- (3) $b_0 \rightarrow \infty$, $a_0 = 0$, 适用于无穷介质, 一般为挤土桩。

1.1.1.4 有限元法

应用有限元法 (finite element method, FEM) 模拟取土器的贯入过程, 可以解决切入土体过程中的几何和材料双重非线性问题。当采用较复杂的土体本构模型

和边界条件时,求解析解、半解析解或近似解是很困难的,应用有限元法可以解决这方面的问题。应该说,有限元分析在贯入问题的分析中具有很多优点。

1987年 Baligh 等^[31]把取土过程看作是无压缩变形、无黏滞性、无转动的液体沿不透水取土筒的流动过程,通过在取土器两头设定不同的水头势能,使液体沿取土筒壁产生流动。在此假设下进行了数值模拟。通过分析模拟结果, Baligh 等指出土样轴线上的土体单元经历了初始压缩、压缩-拉伸和再压缩3个不同的阶段。模拟时 Baligh 采用敞口圆筒模拟取土器,该取土器设有内间隙比,但没有考虑取土器刃角形状和土体抗剪强度的影响。Clayton 等^[32]也曾得到相似的模拟结果。

李家平等^[33]采用 ANSYS 对取土器压入土体过程做了初步数值模拟并对这一过程中产生的扰动进行了评价,同时分析了取土器参数对扰动的影响。由数值模拟结果可知,取土器切入对周围土体产生了扰动影响。取土过程使环形和上端产生了塑性扰动带,其中中心部位扰动相对较小。这部分土的位移以竖向为主,竖向应变经历了压-拉过程。扰动影响因素包括取土器面积比、摩擦系数和刃口角度。竖向正应变等值线图和轴线上竖向正应变随土单元位置的变化图与1995年 Hight^[34]得到的结论类似,表明管内中心部位土样应变基本一致。这说明对以中心土样为重点的取土来说,是可以选用轴线上的竖向应变来评价土样扰动程度的,这与 Baligh^[31]等选用竖向应变作为评价土样扰动程度指标也是相符的。魏汝龙^[35]曾通过一些试验得到这样的结论:竖向应变增加,抗剪强度线性减小。

从理论上讲,有限元法是工程计算中较为通用的方法,可以较全面地反映土体中的应力、位移和孔隙水压力情况。但在实际应用中还存在一些问题:

- (1) 贯入的过程是取土管、土体相互作用的过程,因此对管土之间接触面的分析十分重要,但目前有限元对这方面的问题还没有较好地解决;
- (2) 贯入过程是一个连续的扩张过程,有限元方法无法精确模拟;
- (3) 有限元的计算精度严重依赖于本构模型的选择,以及相应参数的确定。

1.2 软黏土取土对周围土体的扰动影响

1.2.1 取土技术发展概况

自从1932年 Casagrande 发现天然黏土具有复杂的颗粒结构,1949年 Hvorslev 指出不可能取到完全不扰动的土样以来,人们开始认识到研究土样扰动的重要意义。于是很多学者开始从不同角度,采用不同方法进行了大量的有关取土扰动影响的研究,并取得了许多有价值的成果,使人们对取土扰动影响有了更加清楚的认识。

日本和欧美发达国家是对土样扰动研究起步较早的国家。早在20世纪50年

代初,日本就在土质工学会成立了以森博为首的取土研究委员会,该委员会的主要任务包括取土技术、取土质量的研究和取土设备研制等。通过大量的试验研究,他们在取土效率和取土质量方面,均收到了良好效果。例如,他们分析了取土扰动的各种因素,提出了必须采取的相应措施,同时研究了如何判定土样的质量和如何修正质量的不足,还大力研制了适用于各种土质的取土器。现在对于取软黏土的原状取土器,以使用固定活塞式薄壁取土器为最普遍,已成为日本土质学会取土的标准工具。他们还在取土过程中产生扰动的所有原因方面进行不断地研究,例如,由于钻探产生的扰动、取土器规格产生的扰动、取土操作技术问题产生的扰动,甚至由于土样取出后搬运到实验室产生的扰动以及在实验室内用环刀切取试样产生的扰动等原因。20 世纪 60 年代初期,由于引进标准贯入试验和圆锥贯入试验,日本有些放松了对取原状土的研究,1964 年新潟大地震发生后,由于砂土液化问题的出现,为满足砂土动力性质指标的需要,于是又掀起了对原状土,特别是对软黏土和砂土的取土问题的研究热潮。为了克服土样在进入和推出时扰动较大的问题以及钻孔取得的土样是不连续的问题,Begemann^[36] 研制发展了整套不同的连续取样设备。Ladd 和 Lambe^[37] 于 1963 年给出了取土过程中应力变化的假想图,如图 1-3 所示。

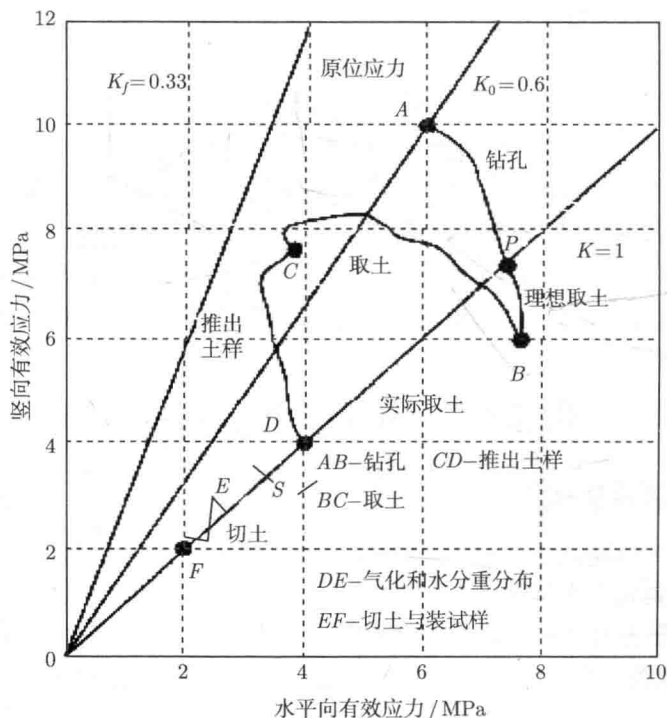


图 1-3 取土过程中应力变化假想图 (图片来源:文献 [37])