

岩土工程新技术及工程应用丛书

远程遥控气压沉箱 技术与应用

李耀良 王建华 周香莲 袁 芬 编著

中国建筑工业出版社

岩土工程新技术及工程应用丛书

远程遥控气压沉箱技术与应用

李耀良 王建华 周香莲 袁 芬 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

远程遥控气压沉箱技术与应用/李耀良等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010

(岩土工程新技术及工程应用丛书)

ISBN 978-7-112-11667-6

I. 远… II. 李… III. 气压沉箱-研究 IV. TU473.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 224608 号

本书在总结气压沉箱技术研究成果和工程经验的基础上编著而成, 详细地论述了远程遥控气压沉箱技术的理论分析方法、设计方法、施工技术、现场监测和设备系统, 并给出了工程实例。此外, 附录部分给出了现代气压沉箱技术施工深基础的现场照片。本书介绍的设计内容、关键施工技术和核心设备, 对于读者具有很高的参考价值。

本书可供从事地下工程设计、施工及管理人员应用与参考, 也可作为高校师生的科研与教学参考书。

* * *

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 崔兰萍

责任校对: 袁艳玲 关 健

岩土工程新技术及工程应用丛书

远程遥控气压沉箱技术与应用

李耀良 王建华 周香莲 袁 芬 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{3}{4}$ 字数: 318 千字

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月第一次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-11667-6

(18925)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

城市大深度大规模的地下空间建设往往面临复杂的周边环境，诸如密集建筑（历史建筑、保护建筑）群区、密集管线区及复杂的地下交通枢纽等敏感区域。常规施工方法的工程降水与开挖作业会引起周边土体的下沉和位移，给邻近建（构）筑物带来严重的影响，甚至造成工程事故。气压沉箱工法因其采用气压平衡水土压力、对周边环境影响小的技术优点，同时具有远低于基坑围护体所需插入深度的要求，有较好的经济效益，因而比较适应城市密集环境的地下工程建设。本书《远程遥控气压沉箱技术与应用》在总结该项技术的工程经验和研究成果的基础上而编著，其目的是为推广气压沉箱工法在工程中的应用。

本书结合近年来上海市基础工程有限公司采用气压沉箱工法进行的工程实践，对气压沉箱工法的原理、特点和国内外发展状况进行了较全面、系统的归纳和阐述。在理论分析方法方面，针对沉箱结构受力状况、沉箱下沉姿态控制、刃脚下土体的极限抵抗力等多方面的问题，系统地介绍了刃脚基础极限承载力、下沉稳定性等计算方法。在沉箱结构设计方面，重点解决强度、变形、稳定等安全问题。内容包括沉箱结构尺寸确定、结构内力变形分析、沉箱支承、压沉装置的设计。施工技术方面，重点介绍了现代气压沉箱工艺、沉箱结构制作和下沉、下沉稳定计算、下沉控制系统、气压下沉箱封底技术、高压下的生命保障系统等方面的内容。在施工控制方面，主要解决了遥控沉箱液压挖机、远程遥控系统、液压升降出土皮带机、螺旋出土机、三维地貌显示系统和监视系统等问题。通过工程实例，详细介绍了采用气压沉箱工法进行深基础工程的理论分析、设计与工程实施，使读者对气压沉箱技术有全面的了解。

本书的作者都是活跃在地下工程领域的中青年科技骨干，本书《远程遥控气压沉箱技术与应用》汇集了他们多年在这一领域共同探索、努力实践和不断创新成果。希望读者能从本书中得到启迪和借鉴，为共同推动气压沉箱工法在我国深基础工程的应用作出更大的贡献。

中国工程院院士 叶可明

2009. 9. 25

前 言

气压沉箱技术是修筑地下结构和深基础的工法，通过气压平衡水土压力进行下沉施工，与常规的施工方法相比，对周边环境影响小。1841年法国首次在煤矿竖井中应用了气压沉箱工法，1923年日本的Tashiro Shiraishi公司引入气压沉箱工法，我国于1894年在桥梁基础施工中引入了该技术。气压沉箱工法的原理是在沉箱下部预先构筑底板，形成一个工作室，向工作室注入压缩空气，以气压平衡外界水土压力，并在高气压的环境下进行取土排土，箱体在本身自重以及上部荷载作用下下沉到指定深度，然后进行封底施工。与传统深基础施工工法相比，气压沉箱工法具有诸多优点。由于工作室气压可平衡底部水土压力，因此无需对土体进行降水或降承压水处理，同时气压的反压作用还起到抵抗基底隆起、防止流砂管涌的作用，从而达到有效控制地面沉降的目的。与传统的气压沉箱相比，现代化的气压沉箱技术可在地面上通过远程控制系统，在高气压的工作室内实现挖排土的无人机械自动化，体现了“以人为本、施工高效”的技术革新。该工法可用来施工桥梁深基础、城市地下工程、给排水工程、隧道工程、港口与海洋工程等。

全书的主要内容包括远程遥控气压沉箱技术的理论分析方法、设计方法、施工技术、现场监测、设备系统和工程实例。理论研究的重点是下沉阶段刃脚基础承载力、下沉稳定性及结构的位移和内力。针对沉箱结构受力状况、沉箱下沉姿态控制、刃脚下土体的极限抵抗力等多方面的问题，系统地介绍了刃脚基础极限承载力的理论分析法以及下沉稳定性的计算方法。在沉箱结构设计方面，重点解决强度、变形、稳定等安全问题。设计内容包括沉箱结构尺寸确定、结构内力变形分析、沉箱支承、压沉装置的设计和刃脚强度验算。施工技术重点研究现代气压沉箱工艺流程、沉箱结构制作技术、沉箱下沉受力、沉箱下沉施工技术、支承、压沉系统施工技术、沉箱封底施工技术、沉箱控制系统、高气压下的生命保障系统等方面的内容。现场监测包括沉箱施工期间的风险分析和监测要求。设备系统主要介绍气压沉箱遥控液压挖机及远程遥控系统、气压沉箱内的皮带出土运输机、物料塔及人员出入塔、螺旋出土机、三维地貌显示系统和监视系统等内容。以上海市轨道交通7号线浦江南浦站—浦江耀华站区间中间风井工程为工程实例，详细介绍了该工程的理论研究、设计计算、施工技术、施工设备和现场监测的内容。其设计内容、关键施工技术和核心设备，具有很高的实用价值。此外，附录部分施工现场照片将有助于读者增加对现代气压沉箱技术施工深基础工程的感性认识。

本书的编写得到相关人士的大力支持，中国工程院叶可明院士为本书作序，上海申通集团有限公司提供工程项目，陈锦剑、余振栋、袁振、赵岚、侯永茂、刘发前、王理想等同志参与了资料的整理和校对工作，在此谨致以诚挚的谢意！

由于作者的理论水平和实践经验有限，不妥之处在所难免，热诚希望读者和同行批评指正。

目 录

第一章	绪论	1
第一节	气压沉箱工法的基本原理	1
第二节	气压沉箱工法的特点	3
第三节	气压沉箱工法在国内外的的发展状况	3
第二章	气压沉箱的分析方法	7
第一节	沉箱刃脚基础地基极限承载力分析方法	7
第二节	下沉稳定性计算	35
第三节	地震响应三维有限元分析	42
第三章	气压沉箱设计方法	43
第一节	总体设计	43
第二节	沉箱结构设计	45
第三节	沉箱下沉计算与稳定验算	51
第四节	沉箱刃脚计算	54
第四章	气压沉箱施工技术与管理	58
第一节	概述	58
第二节	结构制作技术	61
第三节	沉箱下沉受力分析	64
第四节	沉箱下沉施工技术	69
第五节	支承、压沉系统施工技术	72
第六节	设备安装及辅助设备的配备	75
第七节	沉箱封底施工技术	78
第八节	施工过程控制	80
第九节	气压沉箱施工的生命保障系统	82
第十节	沉箱施工的管理	87
第五章	沉箱施工过程的风险分析及监控	93
第一节	沉箱施工期间的风险分析	93
第二节	监控措施	94
第六章	施工设备及配套系统	99
第一节	气压沉箱的主要设备	99
第二节	气压沉箱遥控液压挖机及远程控制系统	101
第三节	气压沉箱内的皮带出土运输机	105
第四节	物料塔的研制	106

第五节 人员塔	108
第六节 移动式减压舱	110
第七节 螺旋出土机	111
第八节 地下（挖掘操作）监视系统	112
第九节 地下挖掘监听及广播音响系统	114
第十节 网络远程访问及控制系统	115
第十一节 气压沉箱供排气系统	116
第十二节 三维地貌显示系统	116
第七章 工程实例	125
第一节 工程概况	125
第二节 工程地质、水文概况	126
第三节 沉箱结构理论计算	128
第四节 沉箱结构设计	146
第五节 沉箱施工技术	168
第六节 施工监测及监测结果分析	175
附录 工程照片	187
参考文献	195

第一章 绪 论

随着城市开发建设的不断深入，城市土地资源越来越稀缺，城市地下空间的开发将越来越成为未来城市发展的趋势和主流方向。在城市中心建筑物密集区开挖建设大深度地下空间，往往面临施工场地狭小、周围重要设施众多的情况。同时，地下施工在开挖时往往会引起地下水位的降低、周围地基的移动与下沉，严重时可能会引起周围地基的塌陷，给邻近地区带来比较严重的影响。另外，市区地铁、地下高速道路及竖井风井系统工程的施工往往受到各方面的限制。相比之下，气压沉箱工法在许多情况下能适应以上这些方面的需求，因而在工程中具有不可替代的竞争力及广泛的应用前景。

第一节 气压沉箱工法的基本原理

气压沉箱工法 (Pneumatic Caisson Method) 的一般原理是在沉箱下部预先构筑底板，在沉箱下部形成一个气密性高的钢筋混凝土结构工作室，向工作室注入压力与刃口处地下水土压力相等的压缩空气，使在无水的环境下进行取土排土，箱体在本身自重以及上部荷载的作用下下沉到指定深度，然后进行封底施工。由于工作室内气压的气垫作用，可使沉箱平稳下沉；同时由于工作室气压可平衡底部水土压力，因此沉箱下沉过程中可防止基坑隆起，涌水涌砂现象，尤其是在含承压水层中施工时，工作室内气压可平衡水土压力，无需地面降水，从而可显著减轻施工对周边环境的影响。该工法可用来施工桥梁深基础工程、城市地下工程、给排水工程、隧道工程、港口与海洋工程等。气压沉箱原理如图 1-1 所示。

其施工工艺与步骤可简略如图 1-2~图 1-6 描述如下：

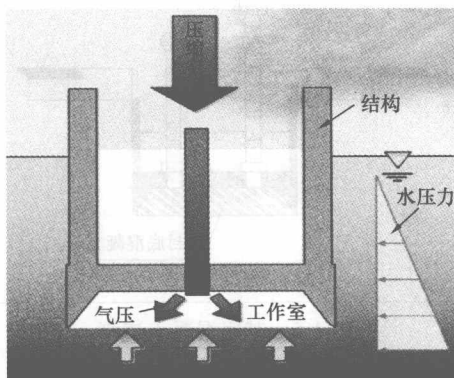


图 1-1 气压沉箱原理

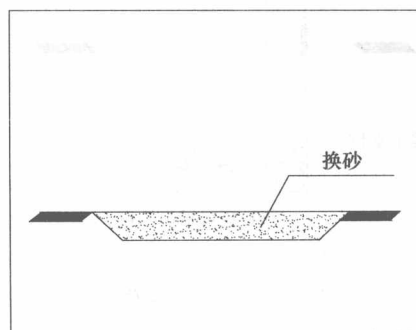


图 1-2 场地平整

(1) 场地平整

沉箱地基场地平整，并保持场地有适当的承载力，见图 1-2。

(2) 作业室的构筑

沉箱下部设置一个作业空间，从这里进行土体的开挖、运输作业。作业室中施加与地下水土压力相当的空气压力，使作业室处于干燥状态，见图 1-3。

(3) 运输出入口的设置

人员进出作业室或土体从作业室排出，需要一个圆形的钢制竖井，该竖井分为人员塔及物料塔两种，见图 1-4。

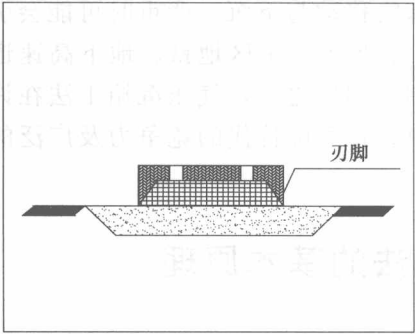


图 1-3 作业室构筑

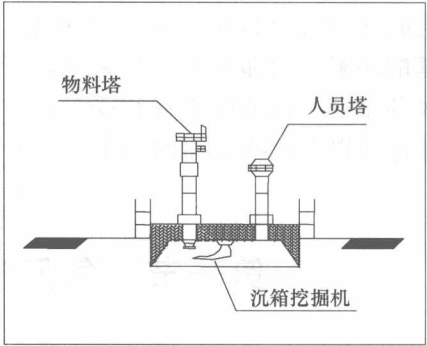


图 1-4 运输出入口设置

(4) 下沉开挖与沉箱体的浇筑

沉箱体通常分段浇筑，每段浇筑约 4m 高的块体；其顺序为浇筑→开挖→浇筑循环进行，直到箱体达到指定深度为止，见图 1-5。

(5) 基底混凝土的浇筑与人员塔、物料塔的拆除

当气压沉箱稳定后，拆除作业室内的设备，在其中浇筑封底混凝土，并拆除人员塔及物料塔，见图 1-6。

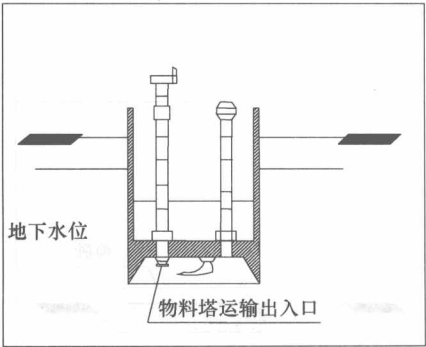


图 1-5 下沉及制作

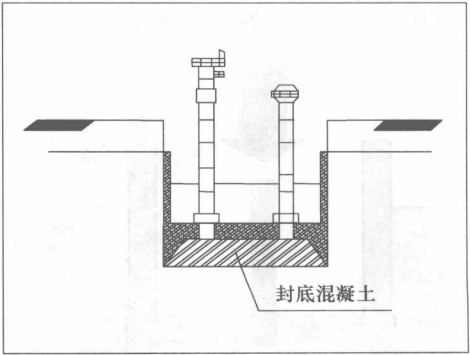


图 1-6 基底混凝土浇筑

第二节 气压沉箱工法的特点

与传统工法相比,气压沉箱工法在深基础(深基坑)等地下建(构)筑物施工中具有诸多的独特优点:

(1) 气压沉箱的侧壁可以兼作挡土结构,与地下连续墙明挖法相比,工程量减少而结构刚度大。而且,气压沉箱工法减少了临时设施用地,可以充分利用狭小的施工空间资源。

(2) 由于连续地向沉箱底部的工作室内注入与地下水土压力相等的压缩空气,因而可以避免坑底隆起和流砂管涌现象,从而控制周围地基的沉降。

(3) 现代化的气压沉箱技术可以在地面上通过远程控制系统,在无水的地下作业室内实现挖排土的无人机械自动化,不会产生污水等工业垃圾,排除的土体也可以作为普通土进行处理。

(4) 相比沉井施工,可以较快地处理地下障碍物,使工程能顺利进行。沉箱顶板封闭后,在下沉的同时可继续在顶板上往上施工内部结构,不像沉井那样过多受地基承载力的限制。

(5) 在市区狭小的地段往往地形复杂,在这种情况下可采用平面形状不规则的气压沉箱进行施工。

(6) 工作室内的压缩空气起到了气垫作用,可以消除急剧下沉的危险情况,同时容易纠偏和控制下沉速度及防止超沉,保证了安全和施工质量。

(7) 气压沉箱利用气压平衡箱底水土压力,作业空间处于无水状态,其优点是不需要进行降水和降压处理。

(8) 由于沉箱以气压平衡水土压力,相比一般的板式围护体系如地下连续墙、排桩等可以显著减少插入深度,并能有效起到反压作用,对控制承压水破坏有利,具有可观的性价比。

(9) 适用于各种地质条件,诸如黏土、砂性土和碎(卵)石,风化岩等地质条件。

(10) 当气压沉箱采用自动化、信息化等高新技术后,将使得地下空间的开发利用可以向大深度、大面积的方向发展,适应经济建设和社会发展的需求。

(11) 沉箱基础建(构)筑物的抗震性能远优于桩、板式结构和沉井基础。根据对1995年日本阪神大地震调查发现,大多数桩基础建(构)筑物均遭致命性损坏,而用气压沉箱工法施工的沉箱基础建(构)筑物均未受到致命性损坏。

第三节 气压沉箱工法在国内外的的发展状况

一、国外发展状况

气压沉箱工法最早诞生在法国,1841年该国的一个煤矿竖井建设中应用了压气方法,使其下沉到水下20m。1851年在英国罗彻斯特修建铁道桥梁基础是采用气压沉箱工法最

早的结构物基础。之后气压沉箱工法在欧洲、北美得到了迅速推广和应用，如 1869～1872 年间，美国纽约修建的连接纽约与布鲁克林的布鲁克林桥（Brooklyn Bridge）基础，1885 年在法国巴黎修建的埃菲尔铁塔（Eiffel Tower）的基础，以及 1901 年在美国纽约中心的曼哈顿修建的摩天大楼（Skyscraper）的基础等都是利用气压沉箱工法修建的。

早期的沉箱多用钢铁制造，以后又相继出现其他材料的沉箱，如钢筋混凝土沉箱等。特大型的沉箱应推 1878～1880 年法国土伦干船坞钢沉箱，其平面为 41m×144m。下沉最深的沉箱为 1955 年位于密西西比河上、跨度 655m 的管道悬索桥，因采用了沉箱周围打深井抽水以降低地下水位的措施，使刃脚下工作最低处在静水位以下达 44m。

1923 年，气压沉箱工法被日本的 Tashiro Shiraishi 公司（SHIRAISHI 基础工程有限公司）引入日本后，首次用以建设跨越 Sumidagawa 河的 Eitai, kiyosu, kuramae, koto-toi 等大桥的基础。1971 年，Hanshin Superhighway 公司在对 Ohhashi 大桥的沉箱基础进行施工时，首次把铁铲应用于带有移动式重动机的沉箱施工工艺中。1981 年，日本的 Highway Public 公司首次采用压缩空气密封仓和无人工作法承建了 Meiko Nishi 大桥第一阶段的基础工程。1988 年，日本的 Tokyo Electric Power 公司采用一种被称为第四代的自动沉箱工法承建了一项建筑工程，这项工程首次使用了用以隔离空气的管道。1990 年，日本首都高速道路的彩虹大桥的四个主塔和停泊点的沉箱基础都是用气压沉箱工法得以顺利完成的，其中抛锚沉箱是世界上最大的一个，其底面积达到 3157m²（70.1m×45.1m）。1995 年，日本的 Highway Public 公司采用无人工作法和大深度气压沉箱工法承建了 Meiko Nishi 大桥第二阶段的基础工程，沉箱下沉深度达到 TP-40m。目前日本已经掌握了非常成熟的大深度基础施工技术。日本部分使用气压沉箱基础施工情况如表 1-1 所示。

日本部分气压沉箱基础施工情况 表 1-1

编 号	工程名称	平面尺寸 (m)	下沉深度 (m)	挖掘方式	竣工年月
1	安治川大水门中央基础	24.0×12.0	51.50	有人机械	1969.05
2	扇岛高炉基础	31.15×31.15	56.30	有人机械	1975.09
3	葛饰拱桥主塔基础	φ24.1	56.15	有人机械	1983.11
4	千叶导水路立坑	20.4×14.1	49.37	有人机械	1985.05
5	营团地铁 8 号线辰巳车站	16.8×28.6	26.0	无人化	1985.05
6	荣桥立坑	12.1×8.6	52.49	无人化	1989.01
7	台场锚干基础	70.1×45.1	46.50	无人化	1990.04
8	彩虹桥台场侧	45.1×70.1	46.5	无人化	1990.05
9	翼桥 P1, P4 (钢外侧)	15.1×35.1	44.0	无人化	1990.10
10	晴海通管路 1 工区基坑	8.4×12.3	48.9	无人化	1992.08
11	名港中央大桥西塔基础	34.1×30.1	52.50	无人化	1993.03
12	名港西大桥西塔基础 (Ⅱ)	40.1×27.1	45.00	无人化	1996.01
13	第二神名员办川桥	26.0×11.0	44.0	无人化	1998.12
14	高砂立坑	φ12.5	51.50	无人化	2000.06
15	柴岛立坑	φ17.6	63.52	无人化	2000.08

二、国内发展状况

气压沉箱工法在我国的应用比日本还要早 29 年，主要在桥梁基础上。中国最先采用沉箱基础的是京山（北京—山海关）铁路滦河桥（1892~1894 年），该桥是在我国铁路工程先驱——詹天佑亲自主持下，在外国人屡筑屡塌的背景下，分析原因重新选址，采用气压沉箱法建造基础，沉箱刃脚嵌入岩石，基础全部用混凝土浇筑，墩身石砌，工程浩大，历时 32 个月建筑而成。1935 年 4 月动工的杭州钱塘江大桥，是我国第一座自行设计的桥梁，由桥梁泰斗茅以升先生设计，桥基承包商为康益洋行（上海市基础工程有限公司前身），桥基即是采用气压沉箱，基础深达 47.8m，工程历时不到两年半，于 1937 年 9 月通车。

我国采用气压沉箱工法分别在北京、上海、四川、安徽、江西、黑龙江等地施工了十多个工程，部分沉箱工程情况如表 1-2 所示。

沉箱工程施工情况 表 1-2

编号	工程名称	平面尺寸 (m)	下沉深度 (m)	土质情况	挖掘方式	施工年月
1	钱塘江大桥	15 个桥墩沉箱	20.0	黏土、细砂、粗砂夹砾石	全人工	1935~1937
2	北京良乡 601 厂 35 号、36 号水源沉箱工程	圆形 内径 4.0 外径 5.2	35 号 6.99 36 号 5.45	细砂、中砂、砂砾、砂质黏土夹砾卵石	全人工	1957
3	富拉尔基重型机械厂（403 厂）热处理车间沉箱工程	37.8×21.3× 29.5	20.5	黏土、细砂、粗砂夹砾石	全人工，砂压重助沉	1957.08~ 1957.10
4	四川德阳重机厂	20×17×12	13.6	黏性土	全人工	1957
5	上海闸北电厂	15×20×20	22.5	软黏土	全人工	1959
6	雅克什木材厂	20×12×14	15	黏土、细砂、粗砂夹砾石	全人工	1960
7	北京有色金属研究院	25×12×15	16.7	黏土	全人工	1963
8	淮南化肥厂水源工程泵房沉箱	27.2×14.7× 19.1	13.14	黏土、细砂、砂质黏土夹砾石	水力机械+人工掏刃脚	1964.09~ 1965.02
9	南昌七里街电厂水泵房沉箱工程	17.2×16.1× 29.3	13.8	淤泥、粉砂、砾砂、砾石	水力机械+人工掏刃脚	1965
10	上海 651 隧道工程（打浦路隧道）2 号沉箱	17.2×16.1× 29.3	32	软黏土	水力机械+人工掏刃脚	1965.4~ 1969.10
11	上海原地铁 04 工程（衡山公园地铁站）沉箱	63.0×21.8× 17.8	20.5	软黏土	水力机械出土，水压重助沉	1965.10~ 1967.11

续表

编号	工程名称	平面尺寸 (m)	下沉深度 (m)	土质情况	挖掘方式	施工年月
12	四川江油电厂	25×15×12	15	黏性土	水力机械出土， 水压重助沉	1966
13	上海轨道交通 7 号线浦 江南浦站~浦江耀华站区 间中间风井	25.24×15.60× 29.0	29.0	软黏土	无人化	2007.01~ 2007.11

综上所述，气压沉箱工法原理是以气压平衡水土压力，作业空间处于无水状态，无需另行对土体进行降水或降承压水处理，同时气压的反压作用还起到抵抗基底隆起、防止流砂管涌的作用，从而达到有效控制地表沉降的目的。而且，采用了现代新技术成果集成的远程遥控气压沉箱工法，在原有“对周边环境的影响小”的突出技术优点的基础上，又增加了“以人为本、施工高效”的新技术优点，对城市密集环境下的大深度、大规模的城市地下空间利用与相邻环境的保护之间的矛盾，提供了一个很好的解决方法和出路，因此具有广阔的应用前景。

同时，工法本身是一种物理的施工方法，在施工中不污染土体，也不产生废浆废气等污染物，排除的土体可作为普通土处理，是一种绿色的施工方法。

相比沉井施工，工作室内的压缩空气起到了气垫作用，可以消除急剧下沉的危险情况，并且容易纠偏和控制下沉速度防止超沉，保证了安全和施工质量；沉箱顶板封闭后，在下沉的同时可继续在顶板上往上施工内部结构，不需像沉井那样过多受地基承载力的限制；此外沉箱由于气压的作用对周边环境的影响小。

相比基坑板式围护体系，由于沉箱以气压平衡箱底水土压力，能有效起到反压作用，可以显著减少插入深度，减少近一半的工程量，具有可观的性价比。与两墙合一地下连续墙相比，其结构混凝土为现浇，还避免了水下混凝土灌注的一些缺陷，墙体质量有保证，结构刚度大而工程量少。另外沉箱基础建（构）筑物还具有抗震性能远优于桩、筏板式结构和沉井基础结构的优点。

第二章 气压沉箱的分析方法

气压沉箱理论研究的重点是计算在下沉阶段刃脚基础承载力、下沉稳定性及结构的位移和内力，同时评价基坑开挖对周边环境的影响。

第一节 沉箱刃脚基础地基极限承载力分析方法

当沉箱刃脚基础的基底压力增长至极限荷载时，基底土体中的塑性变形区充分发展并形成连续贯通的滑移面，地基所能承受的最大荷载称为地基极限承载力，此时地基土体失去稳定而破坏，沉箱下沉。

一、概述

沉箱刃脚基础极限承载力是沉箱能否下沉的关键因素。沉箱基础平面形状复杂，无法得到其理论解，为满足沉箱结构设计和施工的需要，可将沉箱基础简化为条形基础，然后进行理论分析。对于条形基础极限承载力的理论研究起源于 Prandtl 和 Reissner 在地震学报上发表的文章。Prandtl（1920 年）根据塑性理论研究了刚性体压入无重量的介质中，当地基土达到破坏时的滑动面形状极限承载力公式：

$$q_u = cN_c \quad (2-1)$$

式中 q_u ——条形基础的极限承载力；

c ——土的黏聚力；

N_c ——黏聚力所产生的承载力系数；

Prandtl 破坏模式为对称结构，如图 2-1 所示。

Reissner（1924 年）在 Prandtl 的基础上，把基础两侧埋置深度内的土重以连续均布的超载 $q=\gamma D$ 来代替（如图 2-2 所示），得到基础有埋深时的地基极限承载力公式：

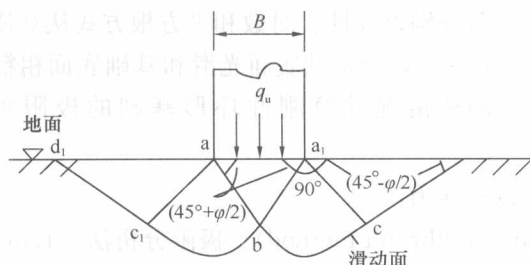


图 2-1 Prandtl 方法计算地基极限承载力

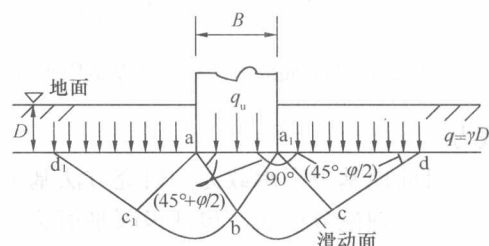


图 2-2 Reissner 方法计算地基极限承载力

$$q_u = cN_c + qN_q \quad (2-2)$$

现对各种地基承载力计算方法简要介绍如下:

1. 极限平衡法

在理想弹-塑性模型中,当土体中的应力小于屈服应力时,应力和变形用弹性理论求解,这时土体中每一点都应满足静力平衡条件和变形协调条件。当土体处于塑性状态时,力的平衡条件仍满足,但是由于塑性变形的出现,不再满足小应变情况下的变形协调条件,但应满足极限平衡条件。极限平衡理论就是根据静力平衡条件和极限平衡条件所建立起来的理论。

2. 极限分析法

极限分析方法又分为上限法和下限法,即是先假定地基土在极限状态下滑动面的形状,然后根据滑动土体的静力平衡条件求解。按照土体极限分析原理,地基土体在极限荷载作用下达至极限平衡状态时,一方面,平衡土体对应的应力场一定满足应力极限平衡方程与应力边界条件,且处处不违背塑性流动法则,由此速度场求得的地基承载力为极限承载力的下限解;另一方面,平衡土体对应的速度场一定满足速率运动平衡方程与位移边界条件,且处处不违背塑性流动法则,由此速度场求得的地基承载力为极限承载力的上限解。

3. 滑移线法

滑移线法根据极限平衡微分方程的特征线与土体内滑移线方程一致的特性,采用特征线方法求解极限平衡微分方程,进而得到破坏区域的滑移线场和应力场。由此可见,滑移线法的理论框架亦属于极限平衡方法,其不同点在于求解极限平衡方程的方法,但是多数还是将滑移线法作为一种独立的分析方法。

在求解地基极限承载力的过程中,极限平衡法、极限分析法以及滑移线法都是在假定地基土体为理想刚塑性体,且不考虑土体应力与变形间的关系的基础上,从理论上来求解地基的极限承载力。而实际土体是由固、液、气三相组成的复杂介质,因此采用理论方法只能给出理想状态下的解析解。

4. 有限差分法

有限差分方法是求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域。有限差分法以 Taylor 级数展开等方法,把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散,从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组。该方法是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法,数学概念直观,表达简单,是发展较早且比较成熟的数值方法。

5. 有限元法

利用有限元法求解地基极限承载力,其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元,在每个单元内,选择一些合适的节点作为求解函数的插值点,将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式,借助于变分原理或加权余量法,将微分方程离散求解。采用不同的权函数和插值函数形式,便构成不同的有限元方法。

有限元法可用于求解非线性问题,并且能够处理各种复杂的边界条件。将有限元法与土的弹塑性本构关系模型相结合,可对地基土进行弹塑性数值分析。长期以来,国内

外许多学者对地基极限承载力进行了有限元分析,并取得了大量有价值的成果。

当利用有限元法求解地基的极限承载力及破坏模式时,需要确定地基土体单元的破坏标准。而确定土体单元的破坏标准是有限元分析地基土体极限承载力和破坏模式中的关键问题。

二、刃脚基础极限承载力的理论分析法

当沉箱刃脚基础平面为方形环形或矩形环形时,可将其等代为圆形环形基础进行承载力计算。环形基础极限承载力的理论分析法包括:极限平衡法,极限分析法和滑移线法等。现对滑移线法进行介绍。

1. 滑移线法基本原理

1) 一阶拟线性偏微分方程组求解

在塑性力学中,一阶拟线性偏微分方程组常具有下列形式:

$$\begin{cases} A_1 \frac{\partial u}{\partial x} + B_1 \frac{\partial u}{\partial y} + C_1 \frac{\partial v}{\partial x} + D_1 \frac{\partial v}{\partial y} = E_1 \\ A_2 \frac{\partial u}{\partial x} + B_2 \frac{\partial u}{\partial y} + C_2 \frac{\partial v}{\partial x} + D_2 \frac{\partial v}{\partial y} = E_2 \end{cases} \quad (2-4)$$

式中,系数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2 是 x 、 y 、 u 、 v 的函数。且 u 和 v 的增量可以表示为:

$$\begin{cases} du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \\ dv = \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \end{cases} \quad (2-5)$$

若将 u 和 v 的偏导数看作变量,将 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2 和 dx 、 dy 作为系数,则式 (2-4)、(2-5) 联立可构成一方程组。如果其系数行列式不等于 0,则方程可解;若等于 0,则不可求这些偏导数值。该方程的特征方程可表示为:

$$a \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 - 2b \left(\frac{dy}{dx} \right) + c = 0 \quad (2-6)$$

式中

$$\begin{aligned} a &= C_1 A_2 - A_1 C_2 \\ 2b &= C_1 B_2 - B_1 C_2 + D_1 A_2 - A_1 D_2 \\ c &= D_1 B_2 - B_1 D_2 \end{aligned} \quad (2-7)$$

方程 (2-6) 可分解为两个方程式:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{a} (b \pm \sqrt{b^2 - ac}) \quad (2-8)$$

上述两个方程式即为一阶拟线性偏微分方程组的特征线方程。

由方程 (2-8) 可看出,如果在某一区域内, $b^2 - ac > 0$,则在这个区域特征方程 (2-8) 有两个实根,这表明一阶拟线性偏微分方程组有两组实特征线,方程组为双曲线型的。

如果在某一区域内, $b^2 - ac = 0$,则在这个区域特征方程的两个实根重合,这表明一阶拟线性偏微分方程组只有一组实特征线,方程组为抛物线型的。