

高等学校水利类专业教学指导委员会等 共同组织编审

全国水利行业规划教材

Shuiyun Gongcheng Shigong 水运工程施工

(第二版)

【港口航道与海岸工程专业】

宋向群 王文渊◎主编
刘亚平 ◎主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为全国水利行业规划教材。全书共分十三章,主要内容包括土石方工程,混凝土结构工程,疏浚与吹填工程,软土地基加固,船闸施工,整治建筑物施工,重力式码头施工,高桩码头施工,板桩码头施工,防波堤与护岸施工,施工管理,施工 BIM 应用等。

本书是高等院校港口航道与海岸工程专业本科生必修课程教材,也可作为海洋工程类其他专业本科生的施工课程教材,还可作为水运工程技术和管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水运工程施工 / 宋向群, 王文渊主编. —2 版. —
北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018. 7

ISBN 978-7-114-14830-9

I. ①水… II. ①宋… ②王… III. ①航道工程—工
程施工—高等学校—教材 IV. ①U615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 135289 号

全国水利行业规划教材

书 名: 水运工程施工(第二版)

著 作 者: 宋向群 王文渊

责任编辑: 黄兴娜

责任校对: 尹 静

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.chinasybook.com>

销售电话: (010)64981400, 59757915

总 经 销: 北京交实文化发展有限公司

印 刷: 北京印匠彩色印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 24.5

字 数: 569 千

版 次: 2004 年 8 月 第 1 版 2018 年 8 月 第 2 版

印 次: 2023 年 2 月 第 2 版 第 2 次印刷 累计第 10 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14830-9

印 数: 2001—4000 册

定 价: 68.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

港口航道与海岸工程专业建设指导组 教材编审分委员会名单

组 长：郑金海(河海大学)

副组长：宋向群(大连理工大学)

周世良(重庆交通大学)

王元战(天津大学)

赵利平(长沙理工大学)

成 员:(按姓氏笔画排序)

王二平(华北水利水电大学)

王志东(江苏科技大学)

刘月琴(华南理工大学)

刘文白(上海海事大学)

刘曙光(同济大学)

孙志林(浙江大学)

何文社(兰州交通大学)

余锡平(清华大学)

邹欣庆(南京大学)

张小峰(武汉大学)

张 华(华北电力大学)

张洪雨(哈尔滨工程大学)

陈一梅(东南大学)

陈子燊(中山大学)

陈 刚(西安理工大学)

拾 兵(中国海洋大学)

桂劲松(大连海洋大学)

郭红民(三峡大学)

黄才安(扬州大学)

董志勇(浙江工业大学)

喻国良(上海交通大学)

秘 书：张继生(河海大学)

序

随着全球经济发展和国家战略深化,近年来港口航道与海岸工程领域的重点逐渐向内河水运开发、远岸岛礁建设、绿色低碳建养、修复加固技术等方向发展,并积极拓展近海可再生能源利用工程方向,这对港口航道与海岸工程专业的学生培养也提出了新的要求。同时,在教育部高教司和中国工程教育认证协会的领导和组织下,从2012年到2015年,教育部高等学校水利类专业教学指导委员会港口航道与海岸工程专业建设指导组先后对港口航道与海岸工程专业的核心知识领域、专业认证补充标准、教学质量国家标准等进行了修订。

为了便于在新形势下各相关高校组织教学,教育部高等学校水利类专业教学指导委员会组织编写出版港口航道与海岸工程专业“全国水利行业规划教材”。为了保证教材质量,我们通过多次专业建设指导组会议讨论,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对教材的选题及其主编、主审和教材编写大纲进行了严格把关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好,我们还成立了教材编审委员会,对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督。

许多人为本套教材建设作出了许多努力,付出了许多心血。但是,由于参照新的教学质量国家标准组织教学还需要通过实践不断总结提高,加之一些教材是第一次编写,因此这套教材一定会有各种不足与缺点,恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材,以利于教、便于学,更希望师生们对此提出建议和积极参与。

教育部高等学校水利类专业教学指导委员会

港口航道与海岸工程专业建设指导组

2015年9月

前 言

随着国民经济的快速发展,我国水运工程建设取得了许多历史性的突破,水运工程施工技术与管理水平也取得了长足的进步。为满足水运工程行业对于人才培养的新要求,教育部高等学校水利类专业教学指导委员会组织编审本教材,并作为全国港口航道与海岸工程本科专业核心课程教材之一。

本书在现有水运工程施工教材的基础上,吸收了近十几年来我国水运工程施工的新技术、新工艺、新方法以及现代信息化技术,并根据交通运输部最新颁布的行业规范对部分内容进行较大修改。全书共分为十三章,内容包括绪论,土石方工程,混凝土结构工程,疏浚与吹填工程,软土地基加固,船闸施工,整治建筑物施工,重力式码头施工,高桩码头施工,板桩码头施工,防波堤与护岸施工,施工管理,施工 BIM 应用。

本书由大连理工大学宋向群教授和王文渊副教授担任主编,由中交第一航务工程局有限公司刘亚平副总工程师(教授级高级工程师)担任主审。其中,大连理工大学王文渊副教授编写第一章至第五章及第十章,江苏科技大学汪宏教授编写第六章并与长江南京航道工程局潘建军、李伟亮等高级工程师共同编写第七章,大连理工大学彭云讲师编写第八章和第十一章,大连理工大学唐国磊副教授编写第九章,大连理工大学宋向群教授编写第十二章,中交水运规划设计院有限公司芦志强副总工程师编写第十三章,全书由宋向群教授负责统稿。

在此,对参加本书编写、审查工作以及为本书编写提供各方面帮助的所有人员,一并表示衷心的感谢。

编 者
2018 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 土石方工程	4
第一节 概述	4
第二节 土石方工程量计算与调配	6
第三节 土方开挖工艺与组织	13
第四节 石方开挖工艺与组织	22
第五节 土石方填筑	34
第三章 混凝土结构工程	38
第一节 钢筋工程	38
第二节 模板工程	43
第三节 混凝土工程	48
第四节 混凝土预制构件制作	63
第五节 预应力混凝土工程	69
第六节 水下混凝土工程	75
第四章 疏浚与吹填工程	80
第一节 概述	80
第二节 挖泥船及其施工方法	82
第三节 疏浚设备选择及产量估算	91
第四节 疏浚泥土处理及吹填工程	97
第五章 软土地基加固	102
第一节 概述	102
第二节 换填法	103
第三节 排水固结法	104
第四节 振冲法	108
第五节 强夯法	112
第六节 深层水泥搅拌法	113
第七节 高压旋喷法	115
第八节 挤密砂桩法	117
第六章 船闸施工	121
第一节 船闸围堰施工	122
第二节 基坑开挖	130
第三节 地基处理	134

第四节	船闸主体施工	141
第五节	导航靠船建筑物施工	153
第六节	金属结构安装	157
第七章	整治建筑物施工	166
第一节	整治建筑物的类型	166
第二节	施工要求及工艺流程	168
第三节	主要分项工程施工工艺及技术措施	172
第四节	水下检测技术	184
第八章	重力式码头施工	189
第一节	抛石基床施工	190
第二节	墙身构件的预制及安装	197
第三节	上部结构及墙后回填	211
第九章	高桩码头施工	215
第一节	概述	215
第二节	预制桩制作、吊运与堆存	218
第三节	桩基施工	221
第四节	桩帽施工	242
第五节	上部结构施工	246
第六节	接岸结构施工	254
第十章	板桩码头施工	258
第一节	概述	258
第二节	前墙施工	262
第三节	锚碇系统施工	269
第四节	墙后回填施工	272
第五节	地下连续墙施工	273
第十一章	防波堤与护岸施工	279
第一节	概述	279
第二节	斜坡堤施工	288
第三节	直立堤施工	302
第四节	护岸施工	304
第十二章	施工管理	307
第一节	概述	307
第二节	水运工程施工准备工作	310
第三节	施工组织设计	317
第四节	流水施工原理	326
第五节	网络计划技术	333

第十三章 施工 BIM 应用	356
第一节 概述	356
第二节 水运工程施工 BIM 应用策划	358
第三节 水运工程施工 BIM 应用管理	363
第四节 水运工程施工 BIM 应用内容	368
第五节 水运工程 BIM 协同应用	372
参考文献	377

第一章 绪 论

随着社会经济的发展和全球一体化进程的加快,交通运输事业的发展脚步不断加快。水路运输因其低廉的价格和巨大的运量,已成为不可替代的重要运输方式,是关系国计民生的关键性行业,对带动区域经济快速发展等具有重要作用。

水运工程施工课程,是研究水运工程施工技术方法、探求水运工程施工组织规律的一门专业课程。为使学生掌握水运工程施工领域内的专业知识,了解近年来我国在水运工程施工中积累的实践经验以及取得的主要成果,本教材系统介绍水运工程施工的专业理论知识、成熟技术和先进方法。通过理论学习及其他实践教学环节,加深学生对水运工程施工的理解,为其将来从事水运工程施工等相关工作打下坚实的基础。

一、水运工程的基本概念

水运工程隶属于土木工程的范畴,是指与水上运输业有关的建筑结构的建设、相关设备的购置和安装,以及为了建设项目所进行的勘察设计、规划布置、施工组织等其他工作的总和,包括港口工程、航道工程、通航建筑物及其辅助标志工程、修造船水工建筑物工程、安装工程及其他附属工程等。

水运工程基本建设程序如图 1-1 所示,主要包括决策阶段(项目建议书、可行性研究)、项目勘察设计、施工准备、组织施工、竣工验收及项目评价。

水运工程决策阶段主要是对项目的建设必要性、技术可行性、经济合理性等进行论证,给出项目的具体建设内容、建设方案等。

决策阶段后,设计主体会对项目进行初步设计,对建设内容进行更为详尽的安排和规划,编制详尽的设计文件。初步设计获得批准后,进行施工图设计,绘制出完整的图纸,为下一步项目施工提供依据。

水运工程施工是水运工程由规划设计方案转变为实体工程的重要阶段,施工质量的好坏直接关系到水运工程结构安全和运营效益。施工完成且竣工验收后,还应由相应的部门对工程后续运营情况进行评价。

二、水运工程施工特点

水运工程作为土木工程的一个分支,其施工技术、步骤及基础理论知识与其他土木工程施工大致相同,但由于其建设地点大多临水或在远离陆地的水中,因此又具有极其独特的行业特点。水运工程施工包含内容较多,与其他土木工程相比,具有以下特点:

1. 施工环境复杂,施工条件恶劣

水运工程施工受自然条件的制约,潮位、泥沙、波浪、水流、台风等对工程建设都有重要的影响。同一地点,不同时间,自然条件也会发生较大的变化。因此,在施工期内充分考虑



自然条件的变化和影响范围,采取有针对性的计划和措施来克服施工过程中可能遇到的各种困难。

2. 隐蔽工程多,协调工作量大

水运工程施工涉及诸多隐蔽工程,如码头基槽、基床及其他下部结构等。隐蔽工程对质量控制的要求高,施工工序连接紧密,同一时间在不同作业平面存在施工重叠,因此必须重视施工组织的空间布置和施工时间安排,使得各工序间有序衔接,保障每一道工序的施工质量。

3. 施工覆盖面广,针对性强

水运工程施工除常见的水工结构、水域疏浚和填海造陆外,还涉及机电设备、给排水、电气、消防、通信等,施工覆盖面广,施工方法针对性强,不同分项工程的施工方案和施工工艺也有很大差别,都需要进行详细的论证和设计。

4. 涉及众多大型设备,技术及管理要求高

水运工程施工需要船舶和大型起重运输机械的协助,对于施工技术及管理要求高,需要施工人员熟悉专业设备的工作原理,能够根据施工实际情况进行设备的选择。

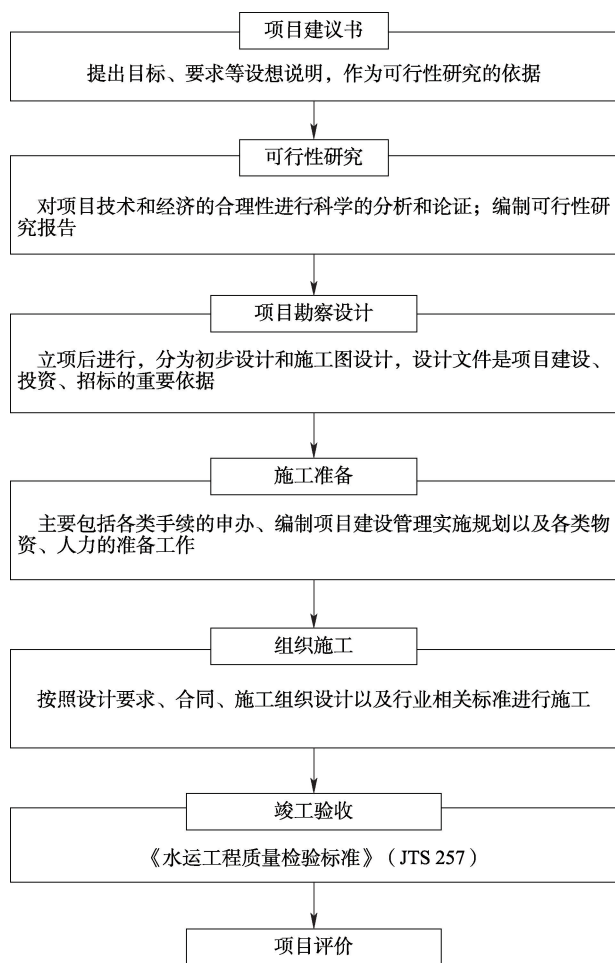


图 1-1 水运工程基本建设程序



三、水运工程施工要求

水运工程施工是以水运工程设计文件和合同为依据、遵循《水运工程施工通则》(JTS 201)等行业相关标准,应用材料、设备及各种理论知识和技能,按计划进行水运工程建造,将设计方案转变为实际工程的过程。水运工程施工必须严格遵守水运工程标准体系中强制性标准的规定。水运工程标准体系是水运工程标准发展的规划蓝图,标准代码采用英文字母和阿拉伯数字表示,强制性标准表示为“JTS * * * —n— * * * *”,推荐性标准表示为“JTS/T * * * —n— * * * *”,其中“JT”表示“交通运输行业标准”,“S”表示“水运工程标准”,“T”表示“推荐性标准”,“* * *”表示标准顺序号,“n”表示分序号,“* * * *”表示发布年。考虑本教材在使用过程中行业标准可能进行修订和完善,书中所涉及标准仅标出标准顺序号及分序号,未列出发布年,使用中应遵循当期施行规范。

水运工程施工应严格遵守国家关于工程建设管理、工程质量、安全生产、节能减排、环境保护和职业健康等方面的法律、法规和规定,贯彻可持续发展的方针;应建立健全质量、安全、职业健康和环境保护管理体系及相应的组织机构;应制定技术先进和安全可靠的施工方案,并应鼓励开展科学研究、技术创新,积极采用新技术、新材料、新工艺和新设备;应结合工程特点和施工条件采取施工安全防护措施和环境保护措施,对可能发生的危害与灾害制定应急预案;施工装备应满足施工条件、施工强度和施工质量控制要求,并应符合国家安全生产、环境保护和节能减排等有关规定。

第二章 土石方工程

第一节 概 述

土石方工程包括土或石的开挖、运输和填筑三个基本施工过程。水运工程中的土石方工程包括场地平整、基坑和基槽开挖、水域疏浚、码头(或坞墙、闸墙)后方回填、基坑回填等。在土石方工程施工前,应完成场地清理、测量放线等辅助工作,并根据施工需要进行排水和边坡支护。土石方开挖或填筑工程量常以万立方米为单位计。施工的各道工序需由多种工程机械相互配合完成,因此在工程中应按综合机械化原理组织施工,进行全面合理的平衡调配,从而提高工效、降低工程造价。水运工程中石方爆破施工应符合现行行业标准《水运工程爆破技术规范》(JTS 204)的规定。

一、土石方开挖及填筑基本方法

土石方开挖分为土方开挖和石方开挖两大类。土方开挖前应根据土壤的物理性质、工程量、工期等因素,选择适当的开挖方法,主要有人工和半机械开挖法、机械开挖法、水力开挖法等;石方一般质地坚硬,开挖难度较大,石方开挖主要采用机械开挖与炸药爆破的方法。

土石方填筑工程要求达到一定的密实度,以满足工程对稳定、防渗和沉降的要求。填筑方法可分为两类:一类是填方不采取压实措施,依靠自然沉降,全高程一次填筑;另一类是水平分层铺筑、逐层压实。

二、土石的分级及工程性质

(一) 土石的分级

在土石方开挖施工中,为估计施工的难易程度,正确选择施工方法及机具,计算工料消耗和工程费用,需将土石按开挖的难易程度进行分级。表 2-1 按坚硬程度、开挖方法及工具将土石分为八类 16 级。通常, I ~ IV 级称为土, V ~ XVI 级称为岩石。

土石的分类、分级

表 2-1

分类	级别	土方的名称	坚实系数 f	密度 (kg/m^3)	开挖方法及工具
一类土 (松软土)	I	略有黏性的砂土;粉土、腐殖土及疏松的种植土;泥炭(淤泥)	0.5 ~ 0.6	600 ~ 1500	能用锹、锄头挖掘
二类土 (普通土)	II	潮湿的黏性土和黄土;软的盐土和碱土;含有建筑材料碎屑、碎石、卵石的堆积土和种植土	0.6 ~ 0.8	1100 ~ 1600	能用锹、锄头挖掘,少许用镐翻松



续上表

分类	级别	土方的名称	坚实系数 f	密度 (kg/m^3)	开挖方法及工具
三类土 (坚土)	III	中等密实的黏性土或黄土;含有碎石、卵石或建筑材料碎屑的潮湿的黏性土或黄土	0.8~1.0	1800~1900	主要用镐,少许用锹、锄头挖掘,部分用撬棍
四类土 (砂砾坚土)	IV	坚硬密实的黏性土或黄土;含有碎石、砾石的中等密实黏性土或黄土;硬化的重盐土;软泥灰岩	1.0~1.5	1900	整个用撬棍、镐,然后用锹挖掘,部分用楔子及大锤
五类土 (软石)	V~VI	硬的石炭纪黏土;胶结不紧的砾岩;软的、节理多的石灰岩及贝壳石灰岩;坚实的白垩;中等坚实的页岩、石灰岩	1.5~4.0	1200~2700	用镐、撬棍、大锤挖掘,部分使用爆破方法
六类土 (次坚石)	VII~VIII	坚硬的泥质页岩;坚实的泥灰岩;角砾状花岗岩;泥灰质石灰岩;黏土质砂岩;云母页岩及砂质页岩;风化的花岗岩、片麻岩及正长岩;滑石质的蛇纹岩;密实的石灰岩;硅质胶结的砾岩;砂岩;砂质石灰质页岩	4.0~10.0	2200~2900	用爆破方法开挖,部分用风镐
七类土 (坚石)	IX~XII	白云石;大理石;坚硬的石灰岩、石灰质及石英质的砂岩;坚硬的砂质页岩;蛇纹岩;粗粒正长岩;有风化痕迹的安山岩及玄武岩;片麻岩、粗面岩;辉绿岩;玢岩;中粗正长岩	10.0~18.0	2500~2900	用爆破法开挖
八类土 (特坚石)	XIII~XVI	坚硬的细粒花岗岩;花岗片麻岩;闪长岩;坚实的玢岩、角闪岩、辉长岩、石英岩;安山岩、玄武岩;最坚实的辉绿岩、石灰岩及闪长岩;橄榄石质玄武岩;特别坚实的辉长岩、石英岩及玢岩	18.0~25.0	2700~3300	用爆破法开挖

注:坚实系数 f 相当于普氏岩石强度系数。

(二) 土石的工程性质

(1) 重度 γ : 单位体积土的重量, 是表示土壤密实程度的主要参数。土的重度介于 $16 \sim 22\text{kN}/\text{m}^3$ 之间, 大于 $20\text{kN}/\text{m}^3$ 的土是比较密实的, 小于 $18\text{kN}/\text{m}^3$ 的土是比较松软的。

(2) 含水率 ω : 土中水的质量与土颗粒质量的比值, 以百分率表示。 ω 反映了土的物理力学性状, 对工程地基的施工、土方的开挖与填筑、土方的密实有直接的影响。不同土的天然含水率可以在很大范围内变动, 砂性土在 $0 \sim 40\%$, 黏性土从 3% 到 100% 以上。土的含水率随气候条件、季节和地下水的影响而变化。

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中: m_1 ——含水状态时土的质量(kg);



m_2 ——烘干后土的质量(kg);

m_w ——土中水的质量(kg);

m_s ——固体颗粒的质量(kg)。

(3)可松性系数:自然状态下的土经开挖后内部组织破坏,其体积因松散而增加,以后虽经回填压实,仍不能恢复其原来的体积,土的这种性质称为土的可松性。一般用最初可松性系数 K_s 与最终可松性系数 K'_s 表示。

$$K_s = \frac{V_2}{V_1}; K'_s = \frac{V_3}{V_1} \quad (2-2)$$

式中: K_s 、 K'_s ——最初可松性系数和最终可松性系数;

V_1 ——开挖前土的自然体积(m^3);

V_2 ——开挖后松散状态下土的体积(m^3);

V_3 ——回填压实后土的体积(m^3)。

各类土的可松性系数可参考表 2-2。在土石方工程中, K_s 是计算挖方装运车辆及挖土机械的重要参数, K'_s 是计算填方时所需挖土工程量的重要参数。

各类土的可松性系数参考值

表 2-2

土 的 类 别		体积增加百分比		可松性系数	
		最初	最终	K_s	K'_s
一类土	种植土除外	8 ~ 17	1 ~ 2.5	1.08 ~ 1.17	1.01 ~ 1.03
	植物性土、泥炭	20 ~ 30	3 ~ 4	1.20 ~ 1.30	1.03 ~ 1.04
二类土		14 ~ 28	1.5 ~ 5	1.14 ~ 1.28	1.02 ~ 1.05
三类土		24 ~ 30	4 ~ 7	1.24 ~ 1.30	1.04 ~ 1.07
四类土	泥灰岩除外	26 ~ 32	6 ~ 9	1.26 ~ 1.32	1.06 ~ 1.09
	泥灰岩	33 ~ 37	11 ~ 15	1.33 ~ 1.37	1.11 ~ 1.15
五 ~ 七类土		30 ~ 45	10 ~ 20	1.30 ~ 1.45	1.10 ~ 1.20
八类土		45 ~ 50	20 ~ 30	1.45 ~ 1.50	1.20 ~ 1.30

(4)内摩擦角 φ 和黏聚力 c :前者是由于颗粒间的互相位移产生的,后者则表示颗粒间的凝聚能力,二者统称为土的抗剪强度指标,属于岩土强度参数,其大小随土的性质、粒径大小和含水率而定。

第二节 土石方工程量计算与调配

在土石方工程施工前,必须计算土石方的工程量,包括开挖和填筑的工程量,以及土方的运输量。为此,需将工程区域划分成一定的几何形状,并采用具有一定精度而又和实际情况近似的方法进行计算。

一、土石方工程量计算方法

基坑和沟槽工程等,可采用横断面法计算;场地整平工程等地形平缓或台阶较宽的地区



的土方量,可采用网格法计算。横断面法计算方法比较简便,但计算精度相对较低;网格法计算精度较高,但计算过程比较复杂。

(一) 基坑和沟槽工程土方量计算

基坑和沟槽工程,一般地形起伏较大或开挖深度较大,且断面不规则,可按下述的横断面法计算土方量。

(1) 绘制横断面图。如图 2-1 所示,横断面应尽可能垂直于等高线,或垂直于建筑物的长边。横断面之间的距离应根据地形变化情况选取,一般为 10m 或 20m,根据需要可选取不同横断面间距,在平坦地区可取大些,但不应超过 100m。

(2) 计算横断面面积。

(3) 计算各段土方量。相邻两横断面间的土方量可按式计算:

$$V = \frac{A_1 + A_2}{2} \times S \quad (2-3)$$

式中: V ——相邻两横断面间的土方量(m^3);

A_1 、 A_2 ——相邻两横断面的挖(填)方断面面积(m^2);

S ——相邻两横断面的间距(m)。

(4) 将各段土方量相加即得总土方量。

(二) 场地平整的土方量计算

场地平整主要通过整个建筑场地的竖向规划,将自然地面改造成人们所要求的平面,为后续工程提供有利的施工平面,它包括场地设计高程确定、土方量计算、土方调配,以及挖、运、填的机械化施工等。

1. 场地设计高程确定

对小型场地平整,如原地形比较平缓,对场地设计高程无特殊要求,可按场地平整施工中挖填土石方量相等的原则确定,称为“挖、填土方量平衡法”。对于大型场地或地形比较复杂时,应采用最小二乘法的原理进行竖向规划设计,计算出最佳设计平面,即“最优设计平面法”。前者概念直观,计算简便,精度能满足施工要求,常被实际施工时采用,但此法不能保证总土方量最小;后者可使场地内方格网角点施工高度的平方和为最小,但计算复杂。本节主要介绍“挖、填土方量平衡法”。

(1) “挖、填土方量平衡法”初步确定场地设计高程。将场地划分为边长为 a 的若干方格,并将方格网角点的原地形高程标在图上,如图 2-2。原地形高程可利用等高线用插入法求得或在实地测量得到。

按照挖填土石方量相等的原则,场地设计高程可按式(2-4)计算:

$$H_0 \cdot N \cdot a^2 = \sum_1^N \left(a^2 \frac{H_{11} + H_{12} + H_{21} + H_{22}}{4} \right)$$

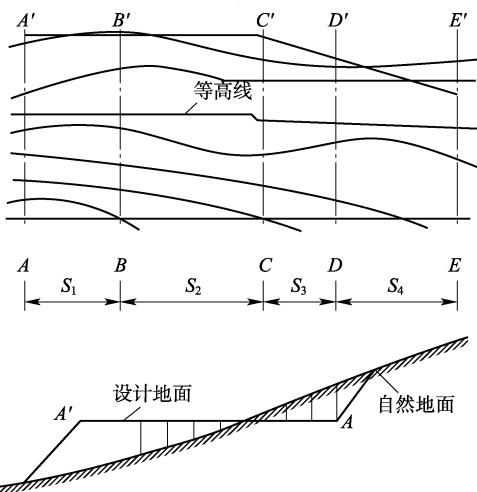


图 2-1 横断面法示意图



即

$$H_0 = \frac{\sum_1^N (H_{11} + H_{12} + H_{21} + H_{22})}{4N} \quad (2-4)$$

式中: H_0 ——所计算的场地设计高程(m);

a ——方格边长(m);

N ——方格数;

H_{11} 、 H_{12} 、 H_{21} 、 H_{22} ——任一方格四个角点高程。

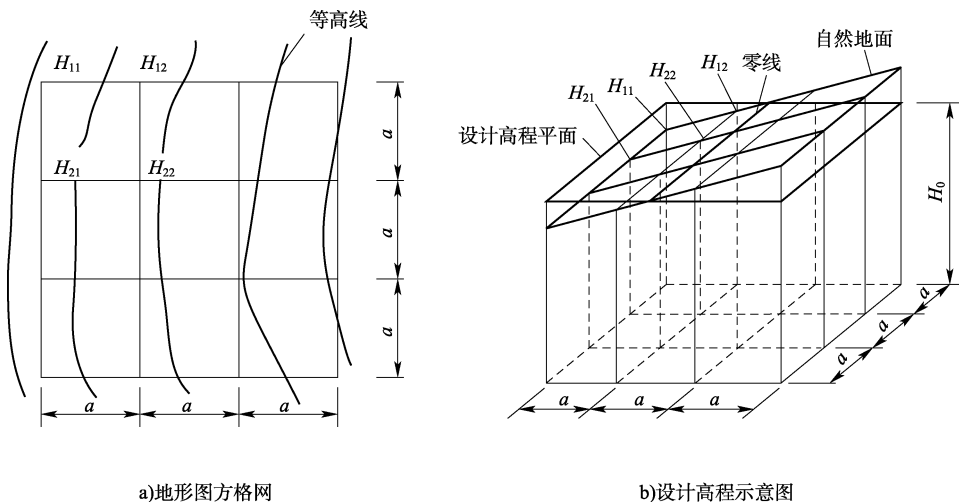


图 2-2 场地设计高程计算示意图

由于相邻方格具有公共角点,在一个方格网中,某些角点为两个相邻方格的公共角点,如图 2-2 中的 12 角点,高程 H_{12} 要叠加两次;某些角点如 22 等要叠加四次,某些角点叠加一次或三次。因此上式可改写为:

$$H_0 = \frac{\sum H_1 + 2 \sum H_2 + 3 \sum H_3 + 4 \sum H_4}{4N} \quad (2-5)$$

式中: H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 ——分别为一个、两个、三个、四个方格仅有或共有的角点高程。

(2) 场地设计高程的调整。

① 土的可松性对场地设计高程的影响。考虑土的最终可松性,需相应提高设计高程,以达到土方量的实际平衡。提高的高度可按下式计算:

$$\begin{aligned} V_T + A_T \Delta h &= (V_w - A_w \Delta h) K_s' \\ \Delta h &= \frac{V_w (K_s' - 1)}{A_T + A_w K_s'} \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中: Δh ——场地设计高程的提高值(m);

V_w 、 V_T ——分别为设计高程调整前的总挖方体积和总填方体积(m^3);

A_w 、 A_T ——分别为设计高程调整前的挖方区总面积和填方区总面积(m^2);

K_s' ——土的最终可松性系数。

② 考虑泄水坡度对场地设计高程的影响。按式(2-5)计算得到的设计平面为一水平的



挖填方相等的场地,实际场地均应有一定的泄水坡度。因此,应根据泄水要求计算出实际施工时所采用的设计高程。

以 z_0 作为场地中心的高程(图 2-3),则场地任意点的设计高程为:

$$z'_i = z_0 \pm l_x i_x \pm l_y i_y \quad (2-7)$$

式中: z'_i ——考虑泄水坡度的角点设计高程。

求得 z'_i 后,即可按下式计算各角点的施工高度 H_i :

$$H_i = z'_i - z_i \quad (2-8)$$

式中: z_i —— i 角点的原地形高程。

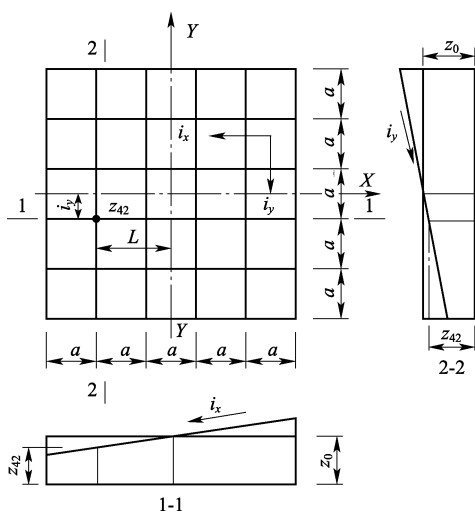


图 2-3 场地泄水坡度

若 H_i 为正值,则该点为填方; H_i 为负值,则为挖方。

2. 土方量计算

(1) 计算方格网角点施工高度。如图 2-4 所示,在方格网的角点分别标出角点号、地面高程、设计高程和施工高度(设计高程与地面高程之差,即挖(-)或填(+)方高度)。

(2) 计算零点位置。当同一方格的四个角点的施工高度全为“+”或全为“-”时,该方格为全填方格或全挖方格;若同一方格内同时有“+”和“-”时,则有挖方区也有填方区,应根据填方和挖方高度计算零点位置(图 2-5),并标于方格网上,连接零点的连线即为零界线,是填方区与挖方区的分界线,挖方区与填方区长度可按下式计算。

$$x_1 = \frac{ah_1}{h_1 + h_2}; x_2 = \frac{ah_2}{h_1 + h_2}; x_3 = \frac{ah_3}{h_3 + h_4}; x_4 = \frac{ah_4}{h_3 + h_4} \quad (2-9)$$

式中: h_1, h_3 ——挖方角点的挖方高度(m);

h_2, h_4 ——填方角点的填方高度(m);

x_1, x_3 ——挖方区长度(m);

x_2, x_4 ——填方区长度(m);

a ——方格网边长(m)。

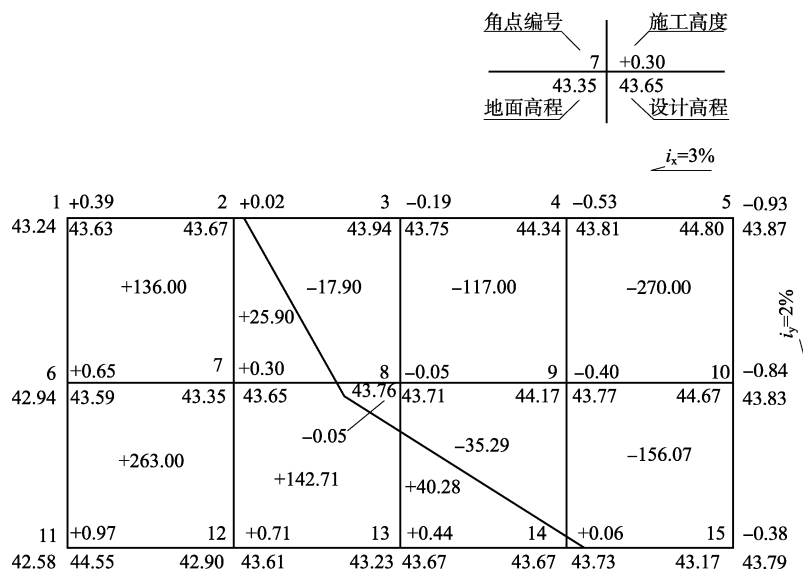


图 2-4 方格网法计算土方量

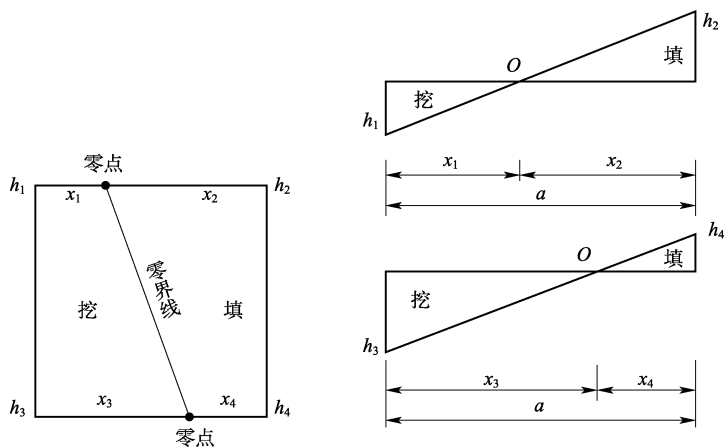


图 2-5 零点(O点)位置计算图

(3) 计算每个方格的挖方或填方量。方格的零线确定后,就可以按照平均高度法计算各方格的填、挖土方量。常用方格网土方量计算公式见表 2-3。

(4) 绘制挖、填方量汇总表。将所有方格计算的土方量按表 2-4 的形式汇总,得该场地挖方和填方的总土方量。



常用方格土方量计算公式

表 2-3

图 示	计 算 公 式
	<p>方格内四角全为挖(填)方时:</p> $V_{\text{挖(填)}} = \frac{a^2}{4}(h_1 + h_2 + h_3 + h_4)$
	<p>三角锥体,当三角锥体全为挖(填)方时:</p> $F_{\text{挖(填)}} = \frac{a^2}{2}$ $V_{\text{挖(填)}} = \frac{a^2}{6}(h_1 + h_2 + h_3)$
	<p>方格网内,一对角线为零线,另两角点一为挖一为填时:</p> $F_{\text{挖}} = F_{\text{填}} = \frac{a^2}{2}$ $V_{\text{挖}} = \frac{1}{6}a^2h_1; V_{\text{填}} = \frac{1}{6}a^2h_2$
	<p>方格网内,三角为填(挖)方,一角为挖(填)方时:</p> $b = \frac{ah_4}{h_1 + h_4}, c = \frac{ah_4}{h_3 + h_4}$ $F_{\text{填(挖)}} = \frac{1}{2}bc; F_{\text{挖(填)}} = a^2 - \frac{1}{2}bc$ $V_{\text{填(挖)}} = \frac{1}{6}h_4bc = \frac{a^2b_4^3}{6(h_1 + h_4)(h_3 + h_4)}$ $V_{\text{挖(填)}} = \frac{a^2}{6}(2h_1 + h_2 + 2h_3 - h_4) + V_{\text{填(挖)}}$ $= \left(a^2 - \frac{1}{2}bc\right) \frac{h_1 + h_2 + h_3}{5}$
	<p>方格网内,两角为挖,两角为填时:</p> $b = \frac{ah_1}{h_1 + h_4}, c = \frac{ah_2}{h_2 + h_3}$ $d = a - b; e = a - c$ $V_{\text{挖}} = \frac{a}{4}(h_1 + h_2) \frac{b+c}{2} = \frac{a}{8}(b+c)(h_1 + h_2)$ $V_{\text{填}} = \frac{a}{4}(h_3 + h_4) \frac{d+c}{2} = \frac{a}{8}(d+e)(h_3 + h_4)$
	<p>方格网内,相对两角为挖(填)方时:</p> $V_{1\text{挖}} = \frac{a^2h_2^3}{6(h_2 + h_1)(h_2 + h_3)}$ $V_{2\text{挖}} = \frac{a^2h_4^3}{6(h_4 + h_1)(h_4 + h_3)}$ $V_{\text{填}} = \frac{a^2}{6}(2h_1 + 2h_3 - h_2 - h_4) + V_{1\text{挖}} + V_{2\text{挖}}$



挖填方量汇总表

表 2-4

方格编号	挖方量(m ³)	填方量(m ³)
1		
2		
⋮		
合计		

3. 土方量计算软件

土方量计算软件,是基于常用的绘图软件平台(如 CAD)开发的对土石方工程进行数据处理,计算填挖方量并绘制平面及断面图形的计算机软件程序。在给定计算参数的情况下,土方量计算软件可精确计算工程量,自动成图,自行生成统计报表,一些软件还可以对工程中的填挖方量进行平衡控制,给出合理的调配方案。与传统手工计算相比,无论计算精度、计算效率,还是在计算劳动强度上,计算软件都有着无可比拟的优势,因此,被广泛地应用于实际工程。在工程应用中,应根据实际工程特点和所处地势,合理选择具有相应算法的计算软件,以达到事半功倍的效果。

二、土方调配方法

土方调配工作是土方施工设计的一个重要内容,是在土方挖填方量基本平衡的原则下,确定填挖区土方的调配方案,使得土方总运输量(m³·km 或 t·km)最小。

(一) 土方调配的原则

- (1) 挖、填方量基本达到平衡,土方总运输量尽可能为最小。
- (2) 近期施工和远期利用相结合。
- (3) 分区调配和全场调配的协调,好土应用于回填质量要求高的填方区。
- (4) 结合其他建筑物的施工,或开挖其土方或留土作为其回填。
- (5) 选择恰当的调配方向、运输路线、运输机具,使土方运输通畅,无对流和乱流现象(运输线路尽量不要交叉)。

(二) 土方调配的基本步骤

综合考虑工程实际情况、有关技术要求、施工进度和土方施工方法,按下列步骤进行土方调配。

(1) 划分土方调配区,确定平均运距和土方施工单价。调配区的划分应该与构筑物的平面布置相协调,并考虑它们的开工顺序和工程的分期施工顺序。其大小应满足土方施工主导机械(挖掘机、铲运机等)的技术要求,范围应该和土方工程量计算用的方格网相协调,通常可由若干个方格组成一个调配区。调配区的大小和位置确定之后,便可计算各填、挖方调配区之间的平均距离和施工单价。

(2) 用“线性规划”方法建立土方调配的数学模型。如果把整个场地划分为 m 个挖方区 A_1, A_2, \dots, A_m , 其挖方量相应为 a_1, a_2, \dots, a_m ; 有 n 个填方区 B_1, B_2, \dots, B_n , 其填方量相应为 b_1, b_2, \dots, b_n 。假定填挖方平衡,即:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (2-10)$$



从 A_i 到 B_j 的平均运距为 C_{ij} , 调配的土方量为 X_{ij} ; 于是土方调配问题的数学模型可以用下式表达:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot X_{ij} \quad (2-11)$$

求一组 X_{ij} 的值, 使目标函数为最小值, 并满足下列约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j, j = 1, 2, \dots, n \\ X_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2-12)$$

(3) 用“表上作业法”进行土方调配。为求解上述线性规划模型, 最小化目标函数, 通常可采用“表上作业法”进行求解。

第三节 土方开挖工艺与组织

土方开挖方法有机械开挖、水力开挖、爆破开挖等。在确定开挖工艺时, 应考虑土壤的物理力学性质、工程量的大小、工期长短以及开挖层内地下水情况、施工机具性能条件等因素, 进行综合比选确定。

一、土方开挖一般要求

陆上基坑开挖前应根据开挖范围、开挖深度、地质条件、地面荷载、施工环境和施工条件等确定施工以及环境保护措施的监测方案。深基坑支护结构应根据实际工程情况进行设计。开挖的顺序和方法应与设计工况相一致, 应遵循开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖的原则。施工过程中应对基坑、支护结构和周边环境进行观察和监测, 当出现异常情况时, 应立即停止开挖, 查清原因并采取相应措施。

岸坡开挖顺序和开挖工艺应满足岸坡稳定的要求。岸坡开挖前应测量开挖区的地形和水深断面, 开挖过程中应对岸坡稳定进行观察和监测, 开挖工作完成后还应对岸坡断面进行测量。

水下基槽开挖的分段长度和分层厚度应根据施工工况、土质条件、回淤情况和施工能力确定。基槽开挖至设计深度时, 应对土质进行核对。

二、土方机械开挖工艺

土方开挖机械的选择, 应根据工程规模(开挖断面、范围和工程量的大小)、工程对象、土质、开挖机械的技术性能以及施工现场条件等确定。土方开挖常用机械主要有挖掘机、铲运机、推土机和装载机等。

(一) 挖掘机械及其施工

挖掘机械类一般用带有齿和刀刃的土斗挖取土料后直接抛置在机械旁或用运输工具运走, 可分为单斗式和多斗式两类。单斗式挖掘机属于循环式挖土机械, 每个循环包括铲土、升高、旋转至卸土地点卸土和回转土斗至开挖位置四个过程。多斗式挖掘机属于连续式挖



土机械,适用于挖掘软或较软的 I ~ IV 级均质土壤,有较高的生产率,常用来开挖狭长的土方和修正边坡等作业。

1. 单斗式挖掘机

单斗式挖掘机通常由行驶装置、动力装置和工作装置三个主要部分组成。行驶装置有履带式、轮胎式等类型。履带式行走方便,对土的单位面积压力小。轮胎式行动敏捷灵活,但斗容量较小,对道路的要求较高。单斗式挖掘机一般以土斗容量为标志。在产品说明书上标明的标准斗容量,通常是按开挖 IV 级土确定。按掘土方式的不同,单斗式挖掘机分为正铲挖掘机、反铲挖掘机、拉铲挖掘机和抓铲挖掘机等。

(1) 正铲挖掘机。前进行驶,铲斗由下向上强制切土(图 2-6),适用于开挖停机面以上的土方,且需与汽车配合完成整个挖运工作。可开挖含水率不大于 27% 的一~四类土以及爆破后的岩石块、冻土块(块的粒径应小于斗口宽度的 1/3)。一般用于大型场地整平土方、开挖大型管沟和基槽、独立基坑及边坡等。其优点是装车轻便灵活,回转移位控制方便,能挖掘坚硬土层,易控制开挖尺寸,工作效率高。

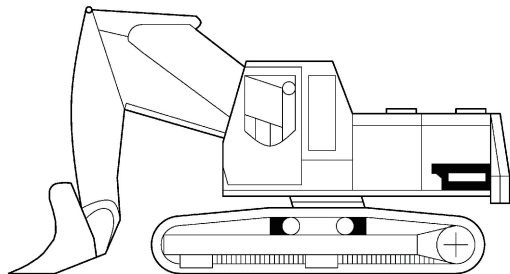


图 2-6 正铲挖掘机

正铲挖掘机的开挖方式,根据开挖路线和运输汽车相对位置的不同,分为正向挖土侧向卸土和正向挖土反向卸土两种,如图 2-7 所示。

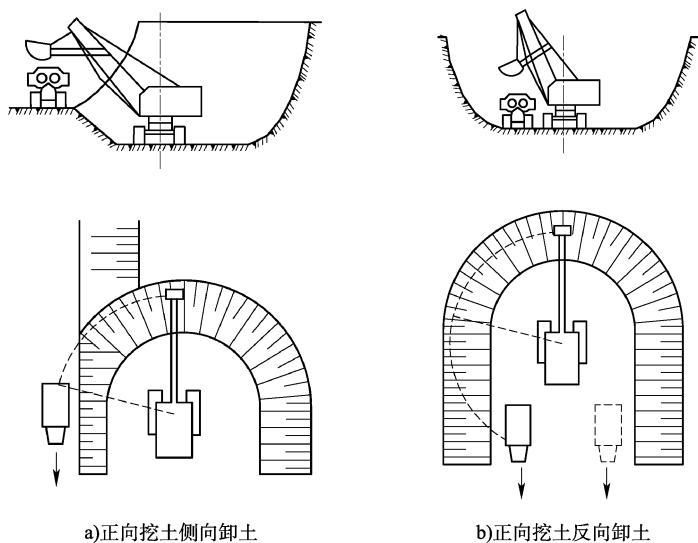


图 2-7 正铲挖掘机开挖方式



侧向卸土法时挖土机臂杆在 90° 以内回转卸土,回转角度小,运输车辆不用倒车,装车方便,工作循环时间短,生产效率高。反向卸土法,工作面较大,但挖土机卸土回转较大,运输工具要倒车,工作循环时间长,生产效率较低(回转角为 180° 时,效率约降低 23%; 为 130° 时,约降低 13%),仅适用于工作面狭小且深度较大无法进行侧向卸土的工程,如基坑、渠道等开挖工程。

(2)反铲挖掘机。反铲挖掘机是水运工程施工中最常用的挖土机械(图 2-8),适用于开挖一~三类土壤。可装土和甩土,土方外运应配备自卸汽车,工作面应有推土机配合。主要用于开挖停机面以下深度不大的基坑(槽)或管沟及含水率较大的土,最大挖土深度为 4~6m,经济合理的挖土深度为 1.5~3.0m。其优点是操作灵活,挖土、卸土均在地面作业,可减少修筑临时道路的数量,但生产效率较低。

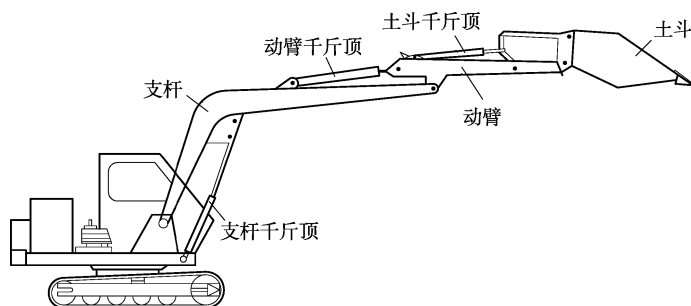


图 2-8 反铲挖掘机

反铲挖掘机的开挖方法主要有沟端开挖法、沟侧开挖法和沟角开挖法。

①沟端开挖法(图 2-9),反铲停于沟端,后退挖土,同时向沟侧卸土或装车运走。臂杆回转角度一般为 $45^\circ \sim 90^\circ$,单次开挖宽度不受机械最大挖掘半径的限制,同时可挖到最大深度,适用于宽基坑的开挖。对于宽基坑除采用多次沟端开挖法完成作业外,也可采用两旁开挖法或“之”字形开挖法,其最大一次挖掘宽度可达反铲有效挖掘宽度半径的 2 倍,但汽车需停在机身后方装土,回转角度增大,生产效率降低。

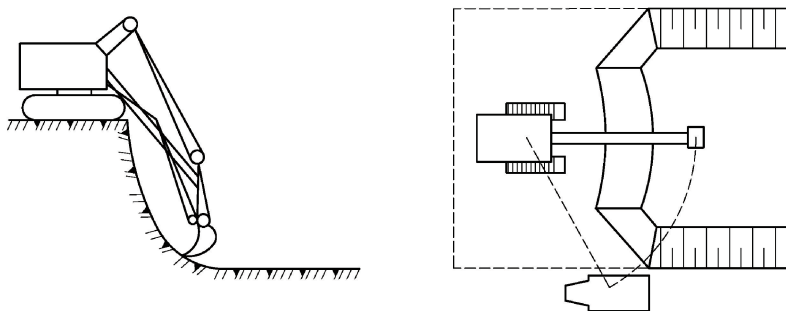


图 2-9 反铲挖掘机沟端开挖法

②沟侧开挖法(图 2-10),反铲停于沟侧,沿沟边直线移动开挖,汽车停在机身旁装土或向沟一侧卸土。回转角度小,能将土弃于距沟边较远的地方,但挖土宽度比挖掘半径小,不易控制边坡,同时机身靠边停放,稳定较差,一般在横挖土方和将土撒到距沟槽较远的距离时采用。

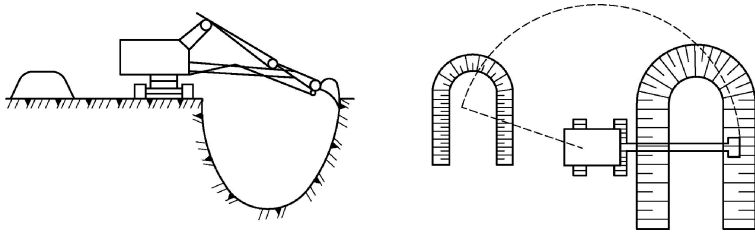


图 2-10 反铲挖掘机沟侧开挖法

③沟角开挖法(图 2-11),反铲位于沟前端的边角上,随着沟槽的掘进,机身沿着沟边向后做“之”字形移动,臂杆回转角度一般在 45° 左右,适用于开挖土质较硬、宽度较小的沟槽。

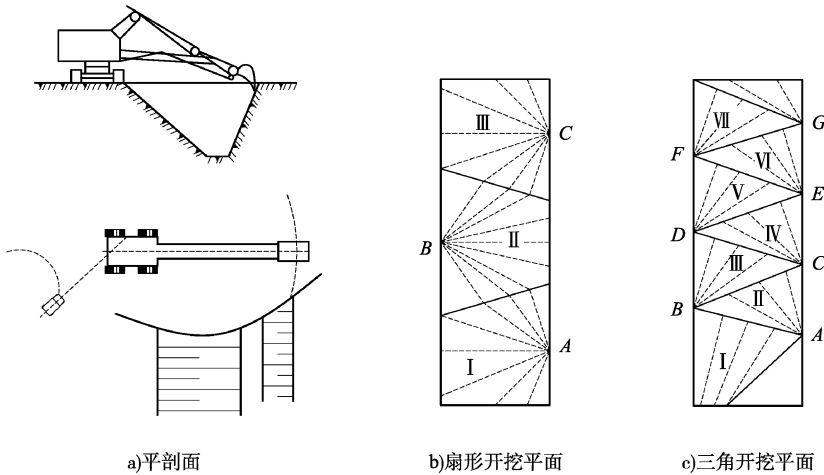


图 2-11 反铲挖掘机沟角开挖方法

(3)拉铲挖掘机。拉铲挖掘机利用惯性,把铲斗甩出后靠收紧和放松钢丝绳进行挖土或卸土,铲斗由上而下,靠自重切土(图 2-12)。适用于开挖一~三类土,主要用于开挖停机面以下深度较大的基坑(槽)、沟渠以及挖取水中土,土方外运应配备自卸汽车,并配备推土机创造施工条件。其优点是挖掘半径及卸载半径大,但操作灵活性差。开挖方法与反铲挖掘机相同,可采用沟端、沟侧和沟角的开挖方法。

(4)抓斗式挖掘机。抓斗式挖土机又称合瓣式挖掘机(图 2-13)。土斗由两个或多个抓瓣组成,工作时靠土斗自重下坠切入土壤,提升时土斗合拢将土抓起。抓斗式挖土机挖土能力小,效率低,主要用于开挖一、二类土壤的窄而深的基坑、沟槽、河泥等土方工程。

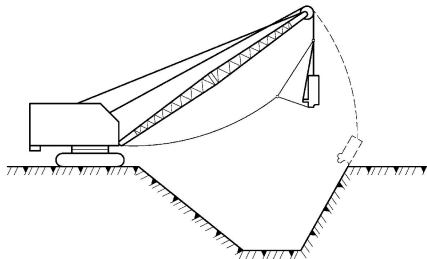


图 2-12 拉铲挖掘机

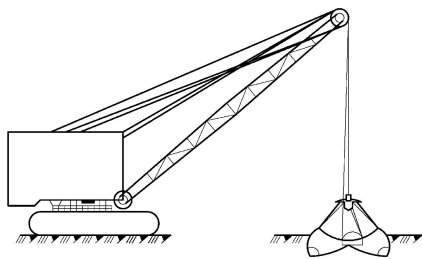


图 2-13 抓斗式挖掘机



2. 多斗式挖掘机

多斗式挖掘机属于连续式的挖土机械,生产效率较高。多斗式挖掘机有斗轮式和链斗式两类,前者将土斗装在刚性转轮上,后者将土斗装在传动链条上。适用于一、二类均质土壤,常用于开挖大型渠道、基坑和土料的开采。

(二) 铲运机械及其施工

铲运机工作原理是将切土刀切入土中,边开行边将土铲入土斗并送到弃土堆或填土区进行卸土(图 2-14),综合完成铲、装、运、卸、平的工作,适用于开挖一~三类土,常用于倾角 20° 以内的大面积整平、开挖、回填压实土方,以及运距 800m 以内的挖运土、填筑路基堤坝等,不适用于砾石层、冻土地带和沼泽地区。其优点是操作简单灵活,不受地形限制,不需特设道路,能独立完成工作,不需其他机械配合能完成铲土、运土、卸土、压实等作业,行驶速度快,生产效率高。

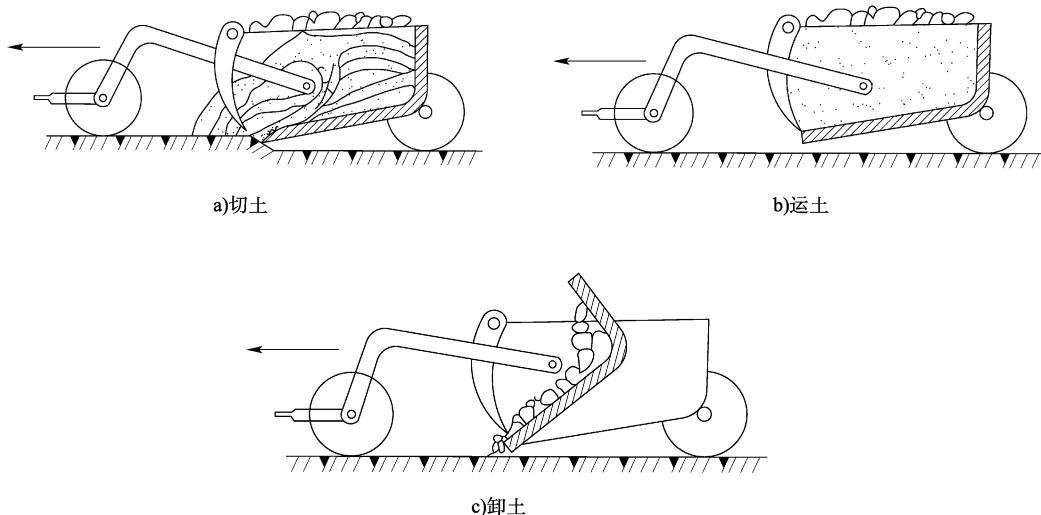


图 2-14 铲运机工作过程

铲运机按行走装置可分为自行式和拖带式两类。自行式由牵引车和铲运斗两部分组成,运行速度快,适宜运距为 800~3500m 的大型土方工程作业,最经济运距为 800~1500m。拖带式多由履带式拖拉机牵引,适宜于作业运距为 80~800m 的土方工程,一般经济运距为 600m。

在使用铲运机组织施工时,应根据工作性质、工程量、运距、土壤性质和地形条件等因素,采用适当的开行方式和施工方法。针对不同的工程环境,铲运机的开行方式主要有环形、“8”字形和连续式等几种。

1. 环形开行方式

从挖方到填方均按封闭的环形线路回转,适用于工作面很短(50~100m)和填方不高(0.1~0.5m)的路堤、路堑、基坑及场地平整等工程。

当挖土和填土交替,而填土区在挖土区的两端时,则可采用大环形开行路线(图 2-15)。其优点是在一个循环中可完成两组“切土—运土—卸土”的作业循环,减少铲运机的转弯次数,提高工效。为避免因长时间在同一个方向转弯而引起机械的单侧磨损,在运行一段时间后,铲运机应掉头反向行驶。

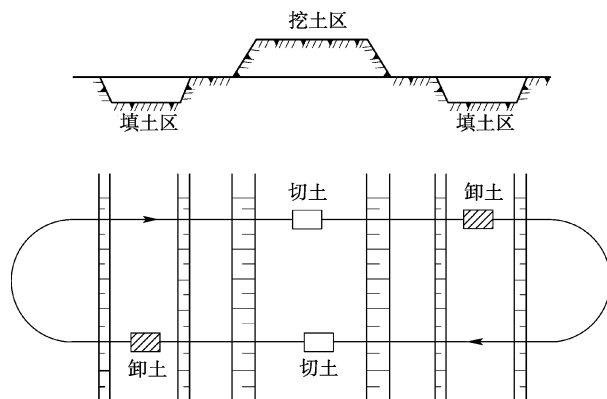


图 2-15 铲运机大环形开行方式

2. “8”字形开行方式

装土、运土和卸土按“8”字形运行(图 2-16)。适用于有较大的挖、填方高差的大型沟槽、沟边卸土和填筑路堤等工程。其优点是一个循环完成两次挖土和卸土,空车行驶距离短,两次转弯方向不同,避免了单侧磨损,需要注意的是转弯时不能铲土和卸土。

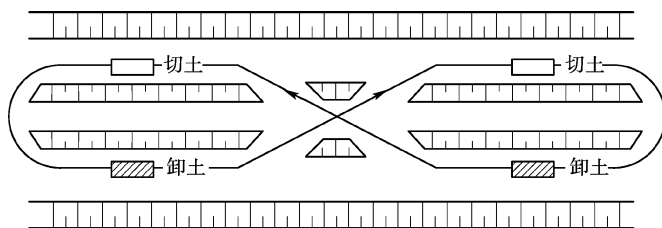


图 2-16 铲运机“8”字形开行方式

3. 连续式开行方式

在同一方向连续进行挖土和卸土(图 2-17),可减少空车运行和转弯次数,提高生产率,同时还可使整个填方场地得到均匀压实。

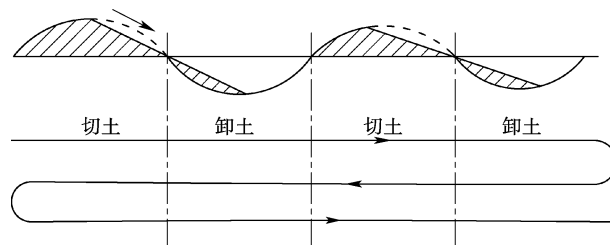


图 2-17 铲运机连续式开行方式

(三) 推土机械及其施工

推土机一般以拖拉机为原动机械,在前缘上装上带切土刀片的推土板。运行时,有刀刃的推土板切入土中,土随着机械的运行而被切下,并堆积在推土板前推送一段距离。推土机除能进行推土外,还可进行铺平土壤的工作。用于开挖一~三类土,经济运距不宜超过