

高等学校土木工程类系列教材

# 土 木 工 程 施 工

(修订本)

刘津明 韩 明 主编

天 津 大 学 出 版 社

## 内 容 摘 要

本书从土木工程专业的需要出发,力求拓宽专业面,扩大知识面,从综合理论知识出发,解决实际问题。重点讲述了施工工艺、施工方法、施工组织、施工管理等方面的知识。全书共十六章,主要内容包括:土方工程、桩基工程、砌体工程、混凝土工程、预应力混凝土工程、滑模施工、结构安装工程、空间结构施工、路桥施工、防水工程、装饰工程、施工组织概论、流水施工原理、网络计划技术、单位工程施工组织设计、施工组织总设计等。

本教材是土木工程专业本科生和专科生的教学用书,也可供相关工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土木工程施工/刘津明,韩明主编,一天津:天津大学出版社,2001.9(2002.11重印)  
ISBN 7-5618-1497-6

I. 土... II. ①刘...②韩... III. 土木工程—高等学校—教材 IV. TU

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第059209号

出版发行 天津大学出版社  
出 版 人 杨风和  
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
印 刷 河北省昌黎县第一印刷厂  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 25.25  
字 数 630千  
版 次 2002年11月第2版  
印 次 2002年11月第2次  
印 数 4000—7000  
定 价 34.00元

# 前 言

“土木工程施工”是土木工程专业的一门主要专业课程，该课程主要研究土木工程施工的工艺流程、施工方法、施工技术、施工机械的选用、工程材料的加工、劳动力的组织、施工现场管理、场地平面布置以及施工各阶段的相互关系、相互配合等问题；该课程还对施工机械、劳动力、材料等资源的配置、工序安排、进度安排、生产和生活安排、科学组织和管理等方面进行了讲述。该课程的目的是以最少的资源消耗取得最大投资效益，以最优的施工组织达到最优的工程质量和工程进度，并达到安全施工的要求。

本书力求拓宽专业面，扩大知识面，以适应市场经济的需要；力求运用有关专业理论技能，解决工程实际问题；力求通过施工新技术、新工艺的学习，培养学生的创新意识，解决土木工程中施工质量与进度的矛盾，解决关键部位施工的矛盾；力求通过经济分析、质量保证分析、安全措施分析等以提高工程综合经济效益，提高工程建设速度，加强质量安全保证体系。

本书按照教学体制改革的要求编写，力求满足土木工程专业的需求，内容尽量符合实际需要，通俗易懂，可作为土木工程专业本科生和专科生教学用书，也可作为工程技术人员的参考用书。

本书共分十六章，编写分工如下：刘津明（第一章、第五章）；阎西康、吴泳川、侯子义（第二章、第六章、第九章）；王小盾（第三章、第八章）；刘志勇（第四章第二节第三节、第十一章）；李延涛（第四章第一节、第十章）；白润山（第七章）；韩明（第十二章至第十六章）。

鉴于编写水平有限且时间仓促，不妥之处在所难免，敬请批评指正。

编 者

2001 年

# 目 录

第一章 土方工程.....	( 1 )
第一节 土的工程分类及性质.....	( 1 )
第二节 场地平整.....	( 3 )
第三节 土方开挖.....	( 15 )
第四节 土方填筑与压实.....	( 38 )
第五节 爆破工程.....	( 41 )
第二章 桩基工程.....	( 48 )
第一节 预制桩施工.....	( 48 )
第二节 灌注桩施工.....	( 54 )
第三章 砌块工程.....	( 61 )
第一节 砌块的种类和规格.....	( 61 )
第二节 砌块建筑的墙体构造.....	( 66 )
第三节 砌块建筑的施工.....	( 69 )
第四章 混凝土结构工程.....	( 78 )
第一节 模板工程.....	( 78 )
第二节 钢筋工程.....	( 91 )
第三节 混凝土工程.....	( 102 )
第五章 预应力混凝土工程.....	( 135 )
第一节 先张法.....	( 135 )
第二节 后张法.....	( 146 )
第三节 无黏结预应力混凝土施工工艺.....	( 160 )
第四节 整体预应力结构施工.....	( 162 )
第六章 滑升模板施工.....	( 166 )
第一节 液压滑升模板施工装置.....	( 166 )
第二节 滑升模板的施工.....	( 174 )
第七章 结构安装工程.....	( 185 )
第一节 起重机械.....	( 185 )
第二节 单层厂房结构安装.....	( 198 )
第三节 多层建筑结构安装.....	( 213 )
第八章 空间网格结构施工.....	( 221 )
第一节 网架结构施工.....	( 221 )
第二节 网壳结构施工.....	( 239 )
第九章 路桥工程施工.....	( 247 )
第一节 道路工程施工.....	( 247 )

第二节	桥梁工程施工	(268)
第十章	防水工程	(279)
第一节	卷材防水工程	(279)
第二节	防水涂膜工程	(288)
第三节	密封材料防水工程	(290)
第四节	刚性防水工程	(292)
第十一章	建筑装饰工程	(298)
第一节	抹灰工程	(298)
第二节	饰面工程	(302)
第三节	涂料工程	(309)
第四节	地面工程	(311)
第五节	吊顶工程	(313)
第十二章	施工组织概论	(318)
第一节	土木工程产品及其生产特点	(318)
第二节	施工准备	(319)
第三节	施工组织设计文件	(320)
第四节	施工组织的基本原则	(322)
第十三章	土木工程流水施工	(325)
第一节	流水施工基本概念	(325)
第二节	流水作业的基本方式	(327)
第三节	流水施工原理在土木工程中的应用	(330)
第十四章	网络计划技术	(333)
第一节	概论	(333)
第二节	双代号网络图的绘制	(334)
第三节	双代号网络图的计算	(339)
第四节	单代号网络图简介	(346)
第五节	网络计划的工期—成本优化	(348)
第六节	网络计划的资源优化	(351)
第十五章	单位工程施工组织设计	(355)
第一节	施工方案的选择	(355)
第二节	施工进度、施工准备和资源供应计划	(357)
第三节	施工平面图	(362)
第四节	工程实例	(365)
第十六章	施工组织总设计	(374)
第一节	施工部署和主要项目施工方案	(374)
第二节	施工总进度计划	(376)
第三节	暂设工程	(379)
第四节	施工总平面图	(392)
参考文献		(396)

# 天津大学建筑工程学院土木工程专业

## 教材教学指导委员会

(以姓氏笔画为序)

主任：姜忻良

委员：王铁成 任兴华 刘惠兰 刘锡良

李忠献 李增福 何玉敖 赵彤

赵奎生 罗定安 郭传镇 顾晓鲁

康谷贻 梁建文 戴自强

本教材已通过天津大学建筑工程学院土木工程专业教材教学指导委员会审查，可作为四年制土木工程专业本科教材。

## 再版前言

本书再版时根据国家最新出版（截止到 2002 年 6 月 1 日）的有关施工质量验收规范进行了全面修订，以适应当前施工教学与实践的需要。

限于编者的知识水平，加之时间仓促，难免有疏误之处，敬请批评指正。

2002 年 10 月

# 第一章 土方工程

土木工程中，常见的土石方工程有：场地平整、基坑（槽）与管沟开挖、路基开挖、人防工程开挖、地坪填土、路基填筑以及基坑回填等。

组织土石方工程施工，尽可能采用机械化施工，以代替或减轻繁重的体力劳动。另一方面，要合理安排施工计划，尽可能不安排在雨季施工，否则，应作好防洪排水等准备。此外，为了降低土石方工程施工费用，贯彻不占或少占农田和可耕地并有利于改地造田的原则，要作出土石方的合理调配方案，统筹安排，以减少土方运输。

## 第一节 土的工程分类及性质

### 一、土的工程分类

土方工程施工和工程预算定额中，土是按其开挖难易程度分类的。

按我国水利电力部颁布的土、石方工程十六级分类法的标准，一般工程土类分 I、II、III、IV 级，见表 1-1。岩石则从 V 到 XVI 级。

表 1-1 一般工程土类分级表

土类级别	土质名称	自然湿密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	外形特征	开挖方法
I	1. 砂土 2. 种植土	1 650~1 750	疏松、黏着力差 或易透水，略有黏性	用锹或略加脚踩开挖
II	1. 壤土 2. 淤泥 3. 含壤种植土	1 750~1 850	开挖时能成块并 易打碎	用锹需要用脚踩开挖
III	1. 黏土 2. 干燥黄土 3. 干淤泥 4. 含少量砾石黏土	1 800~1 950	黏手，看不见砂 粒，或干硬	用镐、三齿耙开挖或用 锹需用力加脚踩开挖
IV	1. 坚硬黏土 2. 砾质黏土 3. 含卵石黏土	1 900~2 400	土壤结构坚硬、 将土分裂后成块状， 或含黏粒砾石较多	用镐、三齿耙等工具开 挖

### 二、土的性质

#### (一) 土的含水量

土的含水量是指土中所含的水与土颗粒的质量比，以百分数表示：

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中  $G_1$  ——含水状态时土的质量；  
 $G_2$  ——土烘干后的质量。

土的含水量过大会给施工带来困难，一般土的含水量超过 20% 就会使运土汽车难以正常行驶。回填土夯实时若含水量过大，土料呈饱和状态，这时会产生橡皮土的现象，无法夯实。土的含水量对土方边坡稳定性也有直接影响。因此，土方开挖时对含水量过大的土层，应采用排水措施；回填土时，应使土的含水量处于最佳含水量范围之内。

## (二) 土的渗透性

土的渗透性是指水体被水透过的性能，它与土的密实程度有关，土的孔隙比越大，则土的渗透系数越大。

法国学者达西根据砂土渗透实验，发现如下关系（达西定律）：

$$V = K \cdot I \quad (1-2)$$

式中  $V$  ——渗透水流的速度，m/d；  
 $K$  ——渗透系数，m/d；  
 $I$  ——水力坡度。

渗透水流在碎石土、砂土和粉土中多呈层流状态，其运动速度服从达西定律。一般用渗透系数  $K$  作为衡量土的透水性指标，渗透系数  $K$  就是水在  $I = 1$  的土中的渗透速度。土的渗透性，取决于土的形成条件、颗粒级配、胶体颗粒含量和土的结构等因素。

## (三) 动水压力和流砂

动水压力：

$$G_D = I \gamma_w \quad (1-3)$$

式中  $G_D$  ——动水压力（又称为渗透力），kN/m<sup>3</sup>；  
 $I$  ——水力坡度（等于水位差除以渗流路线长度）；  
 $\gamma_w$  ——水的容重，kN/m<sup>3</sup>。

动水压力  $G_D$  的大小与水力坡度成正比，即水位差越大， $G_D$  亦越大，而渗流路线越长，则  $G_D$  越小。动水压力的作用方向与水流方向相同。当水流在水位差作用下对土颗粒产生向上的压力时，动水压力使土颗粒受到向上的压力，当动水压力等于或大于土的浸水重度  $\gamma_w$  时，即  $G_D \geq \gamma_w$  时，土颗粒则失去自重，处于悬浮状态，土颗粒能随着渗流的水一起流动，这种现象称为流砂。

在一定的动水压力作用下，松散而饱和的细砂和粉砂容易产生流砂现象，降低地下水位，改变水流方向，消除动水压力，是防治流砂现象的重要途径。其具体措施如下。

(1) 枯水期施工 —— 地下水位低，坑内外水位差小，动水压力减小，不易产生流砂。

(2) 抛大石块法 —— 基坑开挖中出现流砂现象，抢挖至标高后，立即铺设芦席并抛大石块，增加土的压重，以平衡动水压力。此法解决局部或轻微流砂现象是有效的。

(3) 打钢板桩法 —— 将钢板桩打入坑底一定深度，增加地下水由坑外流入坑内的渗流路线，减小水力坡度，从而减小动水压力。浇注地下连续墙可起到同样的效果。

(4) 井点降水法 —— 采用井点降水法可使地下水渗流方向朝下，向下的动水压力增大了土粒间的压力，从而有效地制止了流砂现象。

#### (四) 土的可松性

自然状态下的土经开挖后，其体积因松散而增加，称为土的最初可松性，以后虽经回填压实，仍不能恢复到原来的体积，称为土的最终可松性。

最初可松性系数用  $K_1$  表示，最终可松性系数用  $K_2$  表示，则

$$K_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (1-4)$$

$$K_2 = \frac{V_3}{V_1} \quad (1-5)$$

式中  $V_1$ ——土在自然状态下的体积；

$V_2$ ——土挖出后的松散体积；

$V_3$ ——土经回填压实后的体积。

土的最初可松性系数  $K_1$  是用于计算挖方工程量的主要参数；最终可松性系数  $K_2$  是计算填方工程量的主要参数。土的可松性系数可参考表 1-2。

表 1-2 土的可松性系数

土的名称	可松性系数	
	$K_1$	$K_2$
砂土、轻亚黏土、种植土、淤泥土	1.08~1.17	1.01~1.03
亚黏土、潮湿黄土、砂土混碎(卵)石、填筑土	1.14~1.28	1.02~1.05
重亚黏土、干黄土、含碎(卵)石的亚黏土	1.24~1.30	1.04~1.07
重黏土、含碎(卵)石的黏土、粗卵石、密实黄土	1.26~1.32	1.06~1.09
中等密实的页岩、泥灰岩、白垩土、软石灰岩	1.30~1.45	1.10~1.20

## 第二节 场地平整

场地平整前，必须先确定场地平整的施工方方案，其中包括：确定场地的设计标高（一般均在设计文件上规定）、计算挖方和填方的工程量、确定挖方填方的平衡调配方案，并选择土方机械，拟定施工方法。

### 一、土方量计算

#### (一) 场地设计标高的确定

较大面积的场地平整，正确地选择设计标高是十分重要的。设计标高选择，需考虑以下因素：

- (1) 满足生产工艺和运输的要求；
- (2) 尽量利用地形，以减少挖方数量；
- (3) 尽量使场地内的挖方量与填方量达到平衡，以降低土方运输费用；
- (4) 需有一定的泄水坡度 ( $\geq 0.2\%$ )，使能满足排水要求；
- (5) 考虑最高洪水位的要求。

当设计文件上对场地标高无特定要求时,场地的设计标高,可根据挖填平衡的原则照下述方法确定。

### 1. 初步计算场地设计标高

如图 1-1 (a),将地形图划分方格。每个方格的角点标高,一般根据地形图上相邻两等高线的标高,用插入法求得;在无地形图情况下,也可在地面用木桩打好方格网,然后用仪器直接测出。

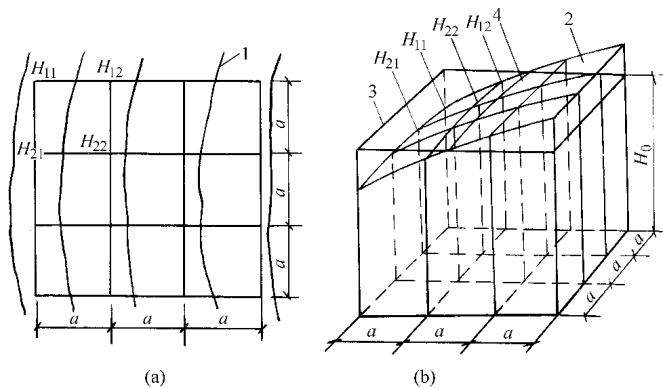


图 1-1 场地设计标高计算简图

(a) 地形图上划分方格; (b) 设计标高示意图

1—等高线; 2—自然地面; 3—设计标高平面; 4—自然地面与设计标高平面的交线(零线)

一般说来,理想的设计标高,应该使场地的土方量在平整前和平整后相等而达到挖方和填方的平衡(图 1-1 (b)),即

$$H_0 N a^2 = \sum \left( a^2 \frac{H_{11} + H_{12} + H_{21} + H_{22}}{4} \right) \quad (1-6)$$

所以

$$H_0 = \frac{\sum (H_{11} + H_{12} + H_{21} + H_{22})}{4N} \quad (1-7)$$

式中  $H_0$ ——场地设计标高的初步计算值, m;

$a$ ——方格边长, m;

$N$ ——方格个数;

$H_{11}, \dots, H_{22}$ ——任一方格的四个角点的标高。

从图 1-1 中可看出,  $H_{11}$  系一个方格的角点标高,  $H_{12}$  和  $H_{21}$  均系两个方格公共的角点标高,  $H_{22}$  则系四个方格公共的角点标高。如果将所有方格的四个角点标高相加,那么,类似  $H_{11}$  这样的角点标高要加到一次,类似  $H_{12}$  和  $H_{21}$  的标高要加到两次,而类似  $H_{22}$  的标高则要加到四次。因此,上式可改写成下列的形式:

$$H_0 = \frac{\sum H_1 + 2 \sum H_2 + 3 \sum H_3 + 4 \sum H_4}{4N} \quad (1-8)$$

式中  $H_1$ ——一个方格的仅有角点标高, m;

$H_2$ ——两个方格的共有角点标高, m;

$H_3$ ——三个方格的共有角点标高, m;

$H_4$ ——四个方格的共有角点标高，m。

## 2. 计算设计标高的调整值

式(1-8)所计算的标高，纯系初步计算值，实际上，还需考虑以下因素进一步进行调整：

- (1) 由于土具有可松性，必要时相应地提高设计标高；
- (2) 由于设计标高以上的各种填方（挖方）工程而影响设计标高的降低（提高）；
- (3) 由于边坡填挖土方量不等（特别是坡度变化大时）而影响设计标高的增减；
- (4) 根据经济比较结果，而将部分挖方就近弃土于场外，或者部分填方就近取土于场外而引起挖填土的变化后需增减设计标高。

## 3. 考虑泄水坡度对设计标高的影响

如果按照式(1-8)计算出的设计标高进行场地平整，那么，整个场地表面将处于同一个水平面；但实际上由于排水要求，场地表面应有一定的泄水坡度。因此，还需根据场地泄水坡度（单面泄水或双面泄水）的要求，计算出场地内各方格角点实际施工时所采用的设计标高。

(1) 单向泄水时，场地各点设计标高的求法：当考虑场地内挖填平衡的情况下，用式(1-8)计算出的设计标高  $H_0$ ，作为场地中心线的标高（图 1-2），场地内任意一点的设计标高则为

$$H_n = H_0 \pm li \quad (1-9)$$

式中  $H_n$ ——场内任意一点的设计标高，m；

$l$ ——该点至  $H_0$  点的距离，m；

$i$ ——场地泄水坡度（不小于 0.2%）；

$\pm$ ——该点比  $H_0$  高则取“+”，反之取“-”号。

例如，欲求  $H_{52}$  角点的设计标高，则

$$H_{52} = H_0 - li = H_0 - 1.5ai$$

(2) 双向泄水时，场地各点设计标高的求法：其原理与前相同，如图 1-3 所示。 $H_0$  为场地中心点标高，场地内任意一点的设计标高为

$$H_n = H_0 \pm l_x i_x \pm l_y i_y \quad (1-10)$$

式中  $l_x$ 、 $l_y$ ——该点在  $x-x$ 、 $y-y$  方向距场地中心线的距离；

$i_x$ 、 $i_y$ ——该点于  $x-x$ 、 $y-y$  方向的泄水坡度。

其余符号表示的内容同前。

例如，欲求  $H_{42}$  角点的设计标高，则

$$H_{42} = H_0 - l_x i_x - l_y i_y = H_0 - 1.5ai_x - 0.5ai_y$$

## (二) 场地土方量计算

场地土方量的计算方法，通常有方格网法和断面法两种。方格网法适用于地形较为平坦的地区，断面法则多用于地形起伏变化较大的地区。

通常用方格网控制整个场地。方格边长主要取决于地形变化的复杂程度，一般为 10 m、20 m、30 m 或 40 m 等，通常多采用 20 m。根据每个方格角点的自然地面标高和实际采用

的设计标高，算出相应的角点填挖高度，然后计算每一个方格的土方量，再将场地上所有方格的土方量求和，并算出场地边坡的土方量，这样即可以得到整个场地的挖、填土总土方量。

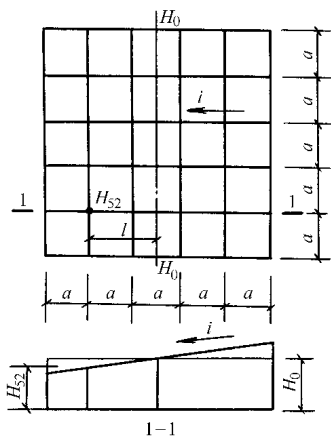


图 1-2 单向泄水坡度的场地

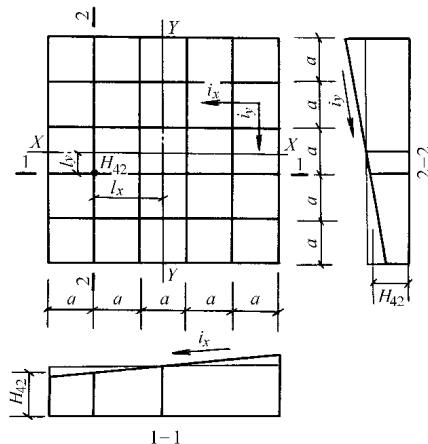


图 1-3 双向泄水坡度的场地

场地诸方格的土方量的计算方法如下。

### 1. 计算零点位置

将方格角点的自然地面标高与设计地面标高的差值，即各角点的施工高度（挖或填），标在方格角点。挖方为（-）填方为（+）。在一个方格网内同时有填方和挖方时，方格网边上的零点位置常采用图解法求出，如图（1-4）。方法是用尺在方格角上按挖填施工高度标出相应比例，用尺相连画线，与方格的边相交点即为零点位置。十分方便，且不易出错。

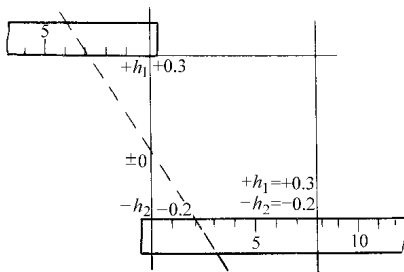


图 1-4 零点位置图解法

### 2. 计算土方工程量

按下列公式计算每个方格的挖方或填方量。

(1) 一个角点填（挖），三个角点挖（填）方

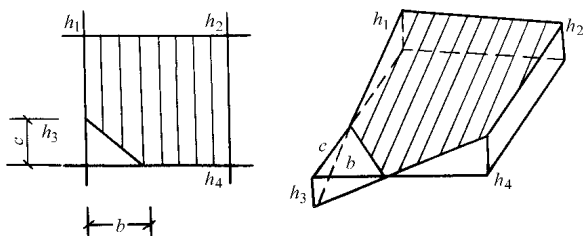


图 1-5 一个角点填（挖），三个角点挖（填）方

$$V_{+} = \frac{1}{2}bc \frac{\sum h}{3} = \frac{bch_3}{6} \quad (1-11)$$

当  $b = c = a$  时,  $V_+ = \frac{a^2 h_3}{6}$

$$V_- = \left( a^2 - \frac{bc}{2} \right) \frac{\sum h}{5} = \left( a^2 - \frac{bc}{2} \right) \frac{h_1 + h_2 + h_4}{5} \quad (1-12)$$

式中  $\sum h$ ——填方或挖方施工高程总和 (以下同)

(2) 两个角点填方, 另外两个角点挖方

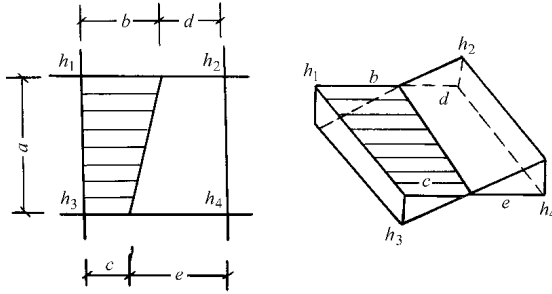


图 1-6 两个角点填方, 另外两个角点挖方

$$V_+ = \frac{d+e}{2} a \frac{\sum h}{4} = \frac{a}{8} (d+e)(h_2+h_4) \quad (1-13)$$

$$V_- = \frac{b+c}{2} a \frac{\sum h}{4} = \frac{a}{8} (b+c)(h_1+h_3) \quad (1-14)$$

(3) 四个角点挖 (填) 方

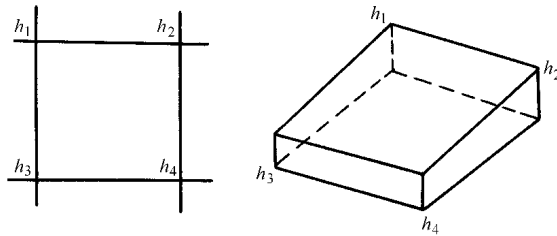


图 1-7 四个角点挖 (填) 方

$$V_- = \frac{a^2}{4} \sum h = \frac{a^2}{4} (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \quad (1-15)$$

### (三) 土方调配

土方工程量计算完成后, 即可着手土方的调配。土方调配, 就是对挖土的利用、堆弃和填土的取得, 三者之间的关系进行综合协调的处理。好的土方调配方案, 应该是使土方运输费用达到最小, 而且又能方便施工。

图 1-8 是土方调配的一个例子。图上注明了挖填调配区、调配方向、土方数量以及每对挖、填区之间的平均运距。图 1-8 共有四个挖方区, 三个填方区, 总挖方和总填方相等。土方的调配, 仅考虑场地内的挖填平衡即可解决 (这种条件的土方调配可采用线性规划的方法确定)。

#### 1. 土方调配原则

(1) 力求达到挖、填平衡和运距最短。

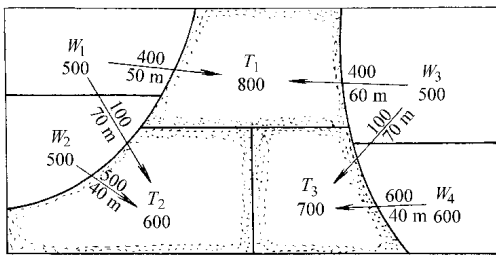


图 1-8 土方调配图

场地内挖、填平衡的调配图。箭头上面的数字表示土方量 (m<sup>3</sup>), 箭头下面的数字表示运距。

(2) 近期施工与后期利用相结合。

(3) 分区与全场相结合。

(4) 尽可能与大型地下建筑的施工相结合。

(5) 选择恰当的调配方向、运输路线, 使土方机械和运输车辆的功效能得到充分发挥。

总之, 进行土方调配, 必须根据现场的具体情况, 有关技术资料、进度要求、土方施工方法与运输方法, 综合考虑上述原则, 并经计算比较, 选择出经济合理的调配方案。

## 2. 土方调配图表的编制

(1) 划分调配区。

在场地平面图上先划出挖、填区的分界线 (即前述的零线), 根据地形及地理等条件, 可在挖方区和填方区适当地分别划分出若干调配区 (其大小应满足土方机械的操作要求), 并计算出各调配区的土方量, 在图上标明 (如图 1-8)。

(2) 求出每对调配区之间的平均运距。

平均运距即挖方区土方重心至填方区土方重心的距离。因此, 求平均运距, 需先求每个调配区的重心。其方法如下。

取场地或方格网中的纵横两边为坐标轴, 分别求出各区土方的重心位置, 即

$$\bar{X} = \frac{\sum vx}{\sum v} \quad \bar{Y} = \frac{\sum vy}{\sum v} \quad (1-16)$$

式中  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  ——挖方调配区或填方调配区的重心坐标;

$v$  ——每个方格的土方量;

$x$ 、 $y$  ——各方格的重心坐标 (通常近似的取方格的形心)。

重心求出后, 标于相应的调配区图上, 然后用比例尺量出每对调配区之间的平均运距。

(3) 列出土方调配方案表。

土方调配方案可依据线性规划的理论, 采用“表上作业法”求出。后面的表 1-9 就是图 1-8 的土方调配方案表。

(4) 画出土方调配图。

依据土方调配方案表在图上标出调配方向、土方数量以及平均运距, 如图 1-8 所示。

### 3. 用“表上作业法”求解土方调配方案

我们的目的是使土方总运输量最小，根据挖填平衡的原则，该问题可列出如下数学模型。

$$\text{目标函数} \quad \min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} S_{ij} \quad (1-17)$$

约束条件

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = T_j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1-18)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = W_i \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1-19)$$

$$X_{ij} \geq 0$$

式中  $X_{ij}$ ——从第  $i$  挖方区运土至第  $j$  填方区的土方量， $m^3$ ；

$S_{ij}$ ——从第  $i$  挖方区运土至第  $j$  填方区的平均运距， $km$ ；

$W_i$ ——第  $i$  挖方区的挖方量， $m^3$ ；

$T_j$ ——第  $j$  填方区的填方量， $m^3$ 。

如果是大型的复杂的土方工程，可以利用计算机求解该线性规划问题。如果是中小型工程，可采用如下的“表上作业法”求解土方调配问题。其求解步骤如下所述。

#### (1) 列运距表。

根据前述的图 1-8 的题意可列如下表格。

表 1-3 土方平衡运距表

挖方区 \ 填方区	$T_1$	$T_2$	$T_3$	挖方量
$W_1$	50	70	120	500
$W_2$	80	40	90	500
$W_3$	60	130	70	500
$W_4$	100	120	40	600
填方量	800	600	700	2 100

表 1-3 中方格的左下角的方框内的数据就是运距，如表中的第一个数据 50 就表示由  $W_1$  至  $T_1$  的运距。

#### (2) 作初始方案。

作初始方案采用最小元素法，即在运算过程中对运距最小者首先满足土方调配要求。如从表中可知道  $W_2$  至  $T_2$  运距最短，为 40，应首先满足它的要求。由题意可知  $W_2$  的挖方量为 500，而  $T_2$  所需填方量为 600，所以，最多  $W_2$  只能给  $T_2$  运送 500。把 500 填入表 1-4 中。 $W_2$  的挖方量已全部用完，可将这一行划掉，以简化以后的运算。按照运距由小到大的顺序，将  $W_4$  给  $T_3$  运送 600、 $W_1$  给  $T_1$  运送 500、 $W_3$  给  $T_1$  运送 300、 $W_3$  给  $T_3$  运送 100、 $W_3$  给  $T_2$  运送 100，依次将这些数据填入表 1-4 中。至此，土方调配初始方案完成。其结果如表 1-4 所示。

表 1-4 土方调配初始方案

	$T_1$		$T_2$		$T_3$		挖方量
$W_1$	50	500	70		120		500
$W_2$	80		40	500	90		500
$W_3$	60	300	130	100	70	100	500
$W_4$	100		120		40	600	600
填方量	800		600		700		2 100

从表中可以看出初始方案满足挖填平衡的原则。

这里需要补充说明的是，根据线性规划的原理，表中所填数据的个数应该为  $(m + n - 1)$  个。从表中可以看出，该初始方案满足  $(m + n - 1) = (4 + 3 - 1) = 6$  这个要求。如果初始方案作下来，不满足  $(m + n - 1)$  的要求，则应补足到  $(m + n - 1)$  个。补充的办法，就是在表中剩余的空格中，选择运距较短的空格，填上 0，以使表中所填的数据凑足到  $(m + n - 1)$  个。并注意填补“0”时，要选择一个适当的方格，该方格不要与已填有数据的方格形成矩形。

### (3) 判断是否最优方案。

初始方案不一定是最优方案，最优调配方案的判断条件是“全部检验数  $\geq 0$ ”。求检验数和判断的步骤如下。

#### ① 作位势表。

位势表有  $m$  行  $n$  列，如下表所示。首先在表中填入在初始方案中已确定有调配关系的“运距值”，也就是在表 1-4 中有运输量的“运距值”填入相应的位置。如表 1-5 所示。

其余空格里的数据用“矩形法”来求得。所谓矩形法就是“构成任意矩形的四个角点的数据，其对角线上的两个数据之和必定等于另外一个对角线上两个数据之和”。如表 1-5 中右下角的四个格中有三个数据，另外一个未知数据可用“矩形法”来求得。已知对角线上的数据之和为  $(130 + 40) = 170$ ，则另外一个对角线上的数据之和  $(70 + x)$  也必定等于 170。所以  $x = 170 - 70 = 100$ （这里需要提醒的是，初始方案的数据不要构成矩形）。根据同样道理可以填出表 1-5 中的所有空格。结果如表 1-6 所示。

表 1-5 位势表

(50)		
	(40)	
(60)	(130)	(70)
		(40)

表 1-6 位势表

(50)	120	60
-30	(40)	-20
(60)	(130)	(70)
30	100	(40)

#### ② 作检验表。

检验表的作法也很简单，就是用运距值减位势表（表 1-6）上对应的值。如表 1-7（实际操作中，可直接填写得数）。

在前面已经谈到判断最优方案的标准就是“全部检验数  $\geq 0$ ”。从表 1-7 中可看到有一个