

19-72
KX

北

高等学校试用教材

铲土运输机械设计

太原重型机械学院 徐希民 主编
同 济 大 学 黄宗益

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

铲土运输机械设计

太原重型机械学院 徐希民

同济大学 黄宗益

主编

江苏工业学院图书馆
藏书章



机械工业出版社

本书根据《铲土运输机械设计》课程教学大纲编写。本书内容包括两大部分：第一部分介绍铲土运输机械的基本理论，土的切削理论和机械的牵引理论；第二部分介绍主要机种——推土机、装载机、铲运机和平地机的设计计算，机型和主要部件结构型式的选择，主要参数的确定，总体设计和布置，工作装置及其液压操纵系统的分析和设计。

本书是高等学校起重运输与工程机械专业的教材，也可供科研单位，工厂技术人员设计参考。

铲土运输机械设计

太原重型机械学院 徐希民 主编
同 济 大 学 黄宗益

*
责任编辑：王世刚 版式设计 霍永明
责任印制：王国光 责任校对 李广孚

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本787×1092¹/₁₆·印张18¹/₂·字数441千字

1989年5月北京第一版·1989年5月北京第一次印刷

印数 0,001—2,600·定价：3.70元

*
ISBN 7-111-01206-2/TH·202(课)

前 言

本书是根据原起重运输与工程机械专业教材编审委员会确定的《铲土运输机械设计》教学大纲编写的。全书共分六章：第一章简要地介绍了土的切削基本概念；第二章较详细地介绍了铲土运输机械的牵引理论，牵引平衡和功率平衡，牵引性能参数的确定，牵引特性和动力特性，参数间的合理匹配等；第三至第六章分别介绍了铲土运输机械四个主要机种——推土机、装载机、铲运机和平地机的设计计算。如何选择机型和主要部件的结构、整机的总体布置、主要参数的选择和确定，工作装置的型式介绍及设计计算，液压操纵系统的分析和介绍等。

本书从教学要求出发，着重讲述基本概念和基本设计方法。并尽量考虑在书中反映铲土运输机械方面的最新科技成果。

本书由太原重型机械学院徐希民和同济大学黄宗益主编，哈尔滨建工学院孙景武和天津工程机械研究所陈之立主审。

本书书稿经天津工程机械研究所燕棠和吉林工业大学许纯新审阅，提出了不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。

参加本书编写工作的有：

太原重型机械学院徐希民：绪论和第四章；

吉林工业大学南基信：第一章和第六章；

西安公路学院孙祖望：第二章；

南京建工学院茅承钧：第三章；

同济大学黄宗益：第五章和统稿工作。

由于我们水平有限，书中难免会有缺点和错误，恳切地希望读者提出批评和指正。

编 者 1988年7月

目 录

绪论	1
第一章 土的切削理论	4
§ 1-1 铲土运输机械与土的关系	4
§ 1-2 土的主要物理机械特性	5
§ 1-3 土的切削理论	9
第二章 铲土运输机械的牵引性能	21
§ 2-1 牵引性能参数的基本概念	21
§ 2-2 牵引平衡和功率平衡	24
§ 2-3 牵引性能参数的确定	32
§ 2-4 牵引特性	47
§ 2-5 动力特性	66
第三章 推土机设计	70
§ 3-1 推土机用途、分类及发展概况	70
§ 3-2 推土机总体设计	78
§ 3-3 推土机稳定性计算	110
§ 3-4 推土机工作装置设计	113
§ 3-5 推土机典型液压系统分析	135
第四章 装载机设计	142
§ 4-1 装载机用途和分类及发展概况	142
§ 4-2 装载机总体设计	151
§ 4-3 装载机的稳定性	180
§ 4-4 装载机工作装置设计	186
§ 4-5 装载机的液压系统	210
第五章 铲运机设计	217
§ 5-1 铲运机的用途、分类、作业方式和生产率计算	217
§ 5-2 铲运机总体设计	224
§ 5-3 铲运机工作装置设计	245
§ 5-4 铲运机的液压系统	257
§ 5-5 链板装载式铲运机基本参数的确定	259
第六章 自行式平地机	263
§ 6-1 平地机的用途、分类、作业方式和生产率计算	263
§ 6-2 平地机总体设计	266
§ 6-3 平地机工作装置设计	282
§ 6-4 平地机的液压系统	286
参考文献	290

绪 论

一、铲土运输机械的组成、用途及其在国民经济建设中的地位

铲土运输机械主要包括推土机、装载机、铲运机、平地机和运土车等几个重要机种，是工程机械中用途最广泛的一个大类。它们可以用来铲装、运输、平整和堆挖土方、石方及各种散装物料。这些机械在国内、外被广泛地应用于民用建筑、水利建设、道路建筑、机场修建、矿山开采、码头建造、农田改良及国防建设等；在某些中、小型工程项目中，这种机械常被用作主要机种进行铲挖平整，而在一些大型工程建设中，则被用作辅助机械来使用；在作业条件恶劣、人烟稀少、物力不足的高原、沙漠、沼泽地带和高寒地区等地，采用这些机械，对减少劳力、提高生产率、加快建设速度，就显得更为有利。总之，铲土运输机械与国家的经济和国防建设、人民的生活都有着密切关系。因此它们在国民经济建设中的作用和地位亦越来越被人们所重视，并得到了迅速的发展。

二、铲土运输机械的发展概况与发展趋势

铲土运输机械是因工程建设的需要而发展起来的，最早使用蒸汽机作为动力，用钢丝绳或其它机械零件作为工作装置的传动元件，目前动力方面已普遍采用汽油机或柴油机，而钢丝绳亦早用液压操纵代替，铲土运输机械的构造和操纵方法已日趋完善和现代化。

目前铲土运输机械的动力，大多仍采用柴油机作为动力，但为了适应各种需要，正在研究如何减少柴油机的噪声和振动，进一步完善排气净化，在高寒地区的低温起动和防冻措施，在热带地区的散热及输出功率的降低，在沙漠地带的防尘，在高山地区功率的提高等课题。底盘方面正在研究在沼泽地带，水下作业的履带和底盘构造，具有防滑措施和效率更高的差速装置、制动装置、防冻橡胶、以及防止钢材的低温脆性断裂等。这些研究的成功，将会使铲土运输机械的使用范围更为广泛。

铲土运输机械今后发展的趋势如下：

1. 向两极发展

为了满足巨大工程的需要，铲土运输机械正在向大型化发展，其单位重量的功率亦愈来愈高，以提高作业速度，加快工程进度；同时为了满足城市建设、环境维护和小型农田建设等工程的特殊要求，常需设计小巧、灵活、机动的机种，因此铲土运输机械亦向小型化发展。

2. 广泛采用新技术，提高自动化程度

目前电子和激光技术在铲土运输机械上的应用还仅仅开始，但这方面的研究和发展却很快。今后自动控制，无人驾驶和远距离遥控都将在某些特殊的铲土运输机械上得到应用，尤其是在危险、有害气体区域、高温场地和水下作业的机械，这类新技术的应用，将会减少驾驶员的劳动量和改善工作环境，并一定会给工程建设带来好处。

3. 提高可靠性和耐久性

铲土运输机械作业条件恶劣，超载、冲击和偏载等情况都经常发生，作业场所又远离维修车间，所以零件的损坏，将给维修工作造成极大困难，给生产带来损失。因此必须确

保零件和产品在使用中的可靠性和耐久性。

4. 改善操纵性能, 提高舒适性

改善操纵技术性能, 增加驾驶员的舒适性, 减少驾驶员的劳动疲劳, 也是提高生产效率的一个有力措施; 例如借助于液压、电气和压缩空气操纵增力装置, 使操纵省力, 在驾驶室内增设取暖、降温和负离子发生器等降温调节空气装置, 以及座椅的高低前后可任意调节, 都能改善驾驶员的工作环境和条件。

总之, 铲土运输机械是向大型化、大功率、高效率、低公害、自动化程度高、安全可靠、能量消耗少、使用周期长、维修简单、操作安全舒适等方面发展。

三、铲土运输机械设计与其它课程的关系和主要内容

本课程是高等工科院校工程机械、筑路机械、建筑机械等专业的主要课程之一。它所牵涉的技术知识较广, 因此应在学习基础课和内燃机、液压及液力传动、金属结构及工程机械底盘等专业课程之后进行学习。

本课程的主要内容有下列四部分:

1. 土的切削理论

介绍铲土运输机械与土的关系; 土的物理机械特性; 土力学的基本知识; 土的破坏形式及其应力状态; 挡土墙理论等土的切削理论方面的基本概念。

铲土运输机械和土壤有密切关系, 土壤与石块是这类机械的作业对象。因此进行铲土运输机械设计, 要学会分析各种工作阻力, 就必须首先学好这部分内容。

2. 铲土运输机械的牵引性能

研究铲土运输机械工作过程中牵引力平衡和功率平衡, 各种阻力和所消耗的功率计算; 确定牵引性能参数, 发动机、传动系、行走机构、工作装置相互间的合理匹配, 确定传动系的档位数和各档传动比; 介绍理论牵引特性和动力特性曲线的绘制方法, 并通过这些曲线分析所设计的铲土运输机械的牵引性能、动力性能和燃料经济性。

3. 铲土运输机械的总体设计

研究铲土运输机械的作业方式, 生产率的计算; 确定铲土运输机械作业时的各种阻力, 确定总体参数并分析它对整机性能的影响; 选择各总成的结构型式并进行合理的总体布置; 进行总体受力分析、确定强度计算工况等。

4. 铲土运输机械工作装置设计

介绍工作装置结构类型; 确定工作装置的主要参数和结构尺寸; 讨论工作装置机构的设计; 进行工作装置的强度计算; 介绍工作装置液压操纵系统。

四、铲土运输机械的设计和试制步骤

铲土运输机械大都是通用机械。使用范围广, 需要量大, 常常是批量生产或大量生产, 因此产品设计必须慎重, 每个机种在投入大批量生产之前, 必须作到图纸、工艺正确无误, 一般说来, 产品试制必须经过样机设计试制、工业试验和鉴定三个阶段。

铲土运输机械设计试制工作, 也和其它重要机械一样或类似, 都要经过下达或提出任务书, 草图绘制, 组织审查, 技术设计和零件设计等几个环节, 其进行程序大致如下:

1. 研究任务书

任务书的来源有很多渠道, 如果是上级机关或使用部门根据某项工程建设需要提出的任务书, 则属于专用铲土运输机械, 这就是说, 在某个特定的场合, 应该发挥最大的生

产率和效率。在这种情况下，就应该实地调查工作环境、工作条件、土壤条件、岩石硬度、铲挖阻力等以作为设计根据，同时应考虑在其它场合使用的可能性和经济性。如果是为开发新产品而编制的任务书，则应考虑将来可能使用的场合，批量生产的成本，制造的技术条件和市场需求情况，经济性能、技术指标等，作为设计依据以保证产品在市场上的竞争力和生命力。

在这种思想指导下，应该广泛征求各方面的意见，搜集市场信息，选择合理的机型，吸取国内、外的先进技术，参考国内、外的具体情况，并发挥设计人员的经验和才能，制定出技术先进、使用性能良好、制造成本低，易于维修，经久耐用和竞争力强的设计方案。要作好这项工作就应该多方搜集产品资料，进行分析比较；深入现场和工地，了解使用部门在使用中发生的事故，机械损坏的情况和原因以及改进的方法，作为今后设计工作中最有力的依据。

2. 草图设计

根据任务书提出的主要参数和要求，参考同类型机械，选用合宜的总成结构型式，确定传动系统，初步确定各总成相互位置及固定方法，并以此为依据，绘制草图（总图）。

在已完成草图设计的基础上，根据各总成的估算重量、重心位置，计算整机的重心位置，验算在作业时的桥荷分配，初步确定轮胎或履带尺寸，验算牵引性能并进行稳定性计算。最后进行经济性能的研究和分析，其中包括燃料消耗、制造成本、维修费用等。如果上述草图设计能通过审查，即可进行下一步工作。

3. 技术设计

在草图设计已通过的基础上，对各总成可提出正式要求，并应按照所提出的正式要求进行设计和绘制正式总成总图。在进行这项工作时，各总成之间，总成和车架之间，原有尺寸和参数常会发生新的矛盾，必须及时解决并修改草图，以取得协调一致。同时检查各运动部分的运动轨迹有无干涉现象并加以消除。各主要零件亦均应经过强度计算，以保证使用要求，最后根据总成装配图绘成整机总图。

4. 工作图设计

工作图设计包括绘制全套工作图纸并编制全部技术文件。一般来说，零件应满足各总成或部件提出的质量和装配要求，同时应尽量减少材料消耗和简化工艺，以降低成本。

除此以外，产品设计不仅需满足使用要求，同时应贯彻系列化、通用化和标准化，这样可以减少设计工作量，便于组织生产，使加工制造简单形成批量，配套容易，维修亦方便。

5. 样机试制

试制样机的目的是通过生产实践来检验设计图纸的正确性和工艺的可行性，用以暴露问题、解决问题、修改设计、修改工艺、并增添必要的设备，重新安排加工和装配方法。

6. 试验鉴定

样机试制出来之后，并不说明样机的使用性能和质量已达到要求，尚应将样机运往规定的或合宜的工业场地，进行规定的工业试验项目，以考查机器的使用情况，技术性能、生产效率是否满足要求，操作是否灵活省力，经济指标是否合乎要求，连续生产不发生事故周期是否达到要求等等。在进行规定的工业试验之后，则可进行鉴定验收工作，应当场进行表演试验，然后进行部分拆卸，以检查易损零件磨损情况，最后经过鉴定，即可投入批量生产。

第一章 土的切削理论

§ 1-1 铲土运输机械与土的关系

铲土运输机械是指利用刀型或斗型切削装置在行走中切削或铲掘土，并能把所铲削的土运送到一定距离自行卸掉的机械。它也包括专门用于越野运输的自卸运输车辆。

铲土运输机械的作业对象，通常是地表的砂、粘土、土砂杂草碎石的堆积物、各种建筑垃圾以及可以铲装的各种石料等，除了大块岩石之外，统称为“土”。

铲土运输机械与土的关系极为密切。这种关系所指的是：一方面是它们的行走机构（车轮或履带）与土的相互作用；另一方面是它们的工作装置（铲刀或铲斗）与土的相互作用。下面以图1-1所示的推土机的作业情况为例来说明这种关系：土是推土机的支承物，不但要保证推土机不下陷，而且要给其履带提供足够的切向牵引力，使得铲刀能切削土壤并将切下的土推移（推土机的运输方式）到指定地点。

这种密切关系是设计推土机时（也是设计其他铲土运输机械时）必须加以考虑的：

（1）土必须能够支承住推土机，使之不发生下陷——保证推土机（一切铲土运输机械）有良好的通过性。通过性反映的是机器的行走机构与土质条件之间矛盾的一个方面，不同的土质条件（坚实路面、松软路面、沼泽地带……）要求有特定参数和结构的行走机构与之相适应，否则机器无法通过，甚至下陷不能自拔，更谈不上作业；

（2）充分发挥机器的牵引力。牵引力是土对行走机构的切向反力，是它们之间综合作用的结果，也就是说它是土质的机械性质与行走机构的结构参数之间合理匹配的结果。例如在湿地作业时，推土机采用三角履带就比普通履带发挥大得多的牵引力，而且具有良好的通过性。

（3）合理选择工作装置的结构和参数，能够降低其切削（或铲掘）阻力，从而降低能源的消耗。

无论是铲刀还是铲斗，在它们与土的相互作用过程中，存在着复杂的受力关系和运动关系，并且两者之间相互影响。工作装置是最能代表工程机械特征的典型部件，它们的性能如何（主要指铲装是否高效而省力），直接标志着该工程机械的作业效率和整机性能。

从铲土运输机械与土之间的密切关系可知，在铲土运输机械的研究和设计中，应当把机器与土的关系作为一个统一的整体来考虑。但是在过去，只偏重于工程的研究，它涉及到热力学、燃烧学、应用力学、振动力学、流体力学、声学、材料、燃料、油料的物理化学性能、制造工艺、发动机、底盘和各部件及标准化等方面的研究；而缺乏对整个机器及部件形态方面的研究，这种研究涉及到：土壤—车辆系统力学、土力学、流变学、土的参

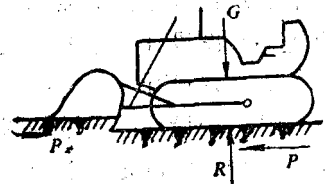


图1-1 推土机作业时与土的关系

数测定法等。

过去在工程方面的研究，取得了相当多的成果，已被应用于铲土运输机械的设计与制造中，因此才能有现代的、相当完善的机器。对于整机及其部件形态的研究、把它与土壤作为一个整体或一个系统来考虑，在全世界还是近20多年的事，这方面的研究也取得一些成果，并被用于铲土运输机械的研究和设计中。当然还有许多问题没有得到解决。在我国，这方面的研究刚刚开始。在铲土运输机械的研究和设计中，由于缺乏这方面资料，还不能使我们的设计达到较高的水平。所以，一个从事铲土运输机械的研究和设计的专家，如果仅仅满足于一般的工程设计而对其作业对象——土的特性及其与机器之间的关系缺乏基本的了解，那么他就不可能是一个真正的工程机械专家。

§ 1-2 土的主要物理机械特性

针对前面所提出的问题，对土的特性必须加以研究。在“土力学”中已经对土的特性做了比较深入的研究，其成果已广泛应用于建筑业中。但是在“机器—地面系统力学”中还不能完全照搬过来，因为无论是行走机构还是工作装置，对土的破坏过程与建筑物的地基对土的破坏过程完全不同，因此土的物理机械特性出现不同的结果。“机器—地面系统力学”作为一个新的学科，将从另一种观点对土的特性加以研究。但是这个学科还相当年轻，在某些方面又必须首先借鉴于“土力学”的理论和试验数据。

在这里不可能对土的各方面知识作全面的介绍，只能针对机器与土的相互作用过程中所涉及到的内容作简要介绍。

一、土的物理机械特性

从土与机器之间的相互作用所涉及到的问题来看，土的物理机械特性主要是指土对机器的反作用过程中表现出来的强度、变形及两者之间的关系（应力—应变关系），即：

强度——土抵抗外力作用而使其自身不发生破坏的能力。土的机械强度如何，将决定一个铲土运输机械所遇到的铲掘阻力的大小，因而决定该机器在作业过程中能源消耗的多少；也决定着机械的结构重量、特征、零部件的强度和材质等。此外，还决定着机器在一定路面上的通过性和牵引能力。可见，强度确实是土的物理机械性能的一个重要方面。

影响土的强度的因素很多，如气候环境——风、光、温度、晴雨等因素影响着土的含水量、密实度以及颗粒组成……。因此，准确地描述土的强度是十分困难的。根据很多资料来看，土的强度变化范围甚广。在一种土质条件下得到的结果，有时不能与在另一种土质条件下得到的结果进行比较。即使是同一类型土质，所得到的结果往往也有较大差异，这就迫使我们要进行大量的土的研究工作。

变形——在外力作用下土的形态和体积的改变。土是由各种不同大小的颗粒所组成的，在颗粒之间存在着水、空气和其他杂质。土在外力作用下，将因为排除间隙中的这些存在物而发生变形。由于种种条件的限制，在同样外力的作用下，土的变形量可能很大，也可能很小。如果外力不去掉，形状或体积将可能随时间的推移而不断变化。这里要强调的是，单纯讨论土的变形，并不能充分说明土的物理机械性能，而抓住其应力—应变关系才是抓住事物的本质。任何不以应力—应变关系为基础进行数学上的描述，都是能近似地说明土的真实性能的某种表现。因此，探讨和阐明应力—应变关系，并从而确定土的参

数，是研究与铲土运输机械设计有关的土力学的一个重要领域。如果土的应力—应变关系不确定，则土的物理机械性能没有被清楚地加以认识，就失去了研究的意义。

土的应力—应变关系如图1-2所示。它是在法向应力不变的情况下，剪切应力对应变所作的图。三条曲线代表了性能的观察范围。曲线A代表高度粘结干燥土或坚硬纯砂土的特性，这种类型的土有一个高强度峰值。当反映高粘结力（土颗粒之间的内聚力）的粘结键被裂时，初始失效发生，继续测定则剪应力降低，降低了的剪应力反映出摩擦力的性质。曲线B代表另一种极端，是松散内聚力低的土。除了上述两种极端情况之外，大多数土的剪切特性都处于两者之间，可用曲线C表示其剪切特性。

试验曲线表示剪切应力 τ 达到一个明确的峰值（曲线A）或达到一个高平部分（曲线B），都可判断土是否发生初始失效。对于给定某种条件的土，在不同的法向应力 σ 状态下，可测得一系列剪应力值。将土的初始失效的剪应力值 τ 对相应的法向应力 σ 值作图，如图1-3所示，则 τ - σ 是线性关系。每种土都有这样的一条线性关系，但它们的斜率可能各不相同。而每条直线都在 $\sigma = 0$ 处有其 τ 值（分别为 C_A 、 C_C 和 $C_B = 0$ ）来表示该种土的内聚力 C ；每条线的斜率都表示该种土的内摩擦角 ϕ （分别为 $\phi_A = 0$ 、 ϕ_B 、 ϕ_C ）。可见，一条直线可用一个方程式表示：

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (1-1)$$

式中 τ ——剪切应力，

σ ——法向应力，

C ——内聚力，

ϕ ——内摩擦角。

式(1-1)是土体抗剪强度的数学模型，其中参数 C 和 ϕ 是由剪切试验测得的量。我们感兴趣的不仅仅如此，还要知道土体在达到初始失效的剪切应力（即极限剪切应力）时，土体发生破坏时的规律，那就是在极限剪切应力状态产生滑移时滑移面的位置、方向及其与主应力之间的关系。这个问题将在§1-3中详细叙述。

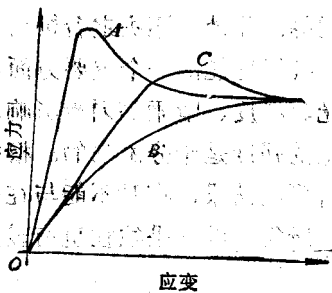


图1-2 土的剪应力—应变关系

A—粘性土 B—松散砂性土 C—砂质粘土

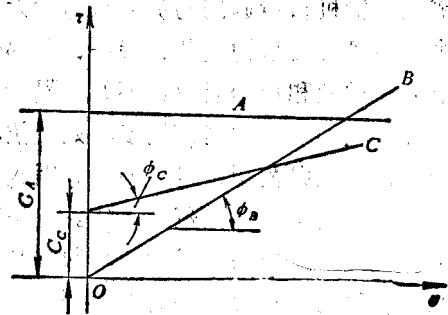


图1-3 土的极限剪应力

A—粘性土 B—松散砂质土 C—砂质粘土

根据土的应力—应变关系，大体上可将它分为三类。其中的砂质粘土介于纯粘性土和纯砂性土之间，其砂质成分的含量又在较大范围内变动，因此其力学特性的变化范围也很广。为了便于在研究和设计中考虑和应用，将它们分为多种级别，见表1-1。

每种土的性能究竟如何，与下列因素密切相关：土的颗粒大小组成及各种颗粒成分所

占比例；物理化学结合的因素；有机物质成分；含水量；密实度；粘聚力及内摩擦角等。这些因素及其术语也是今后经常要用到的，为此有必要对它们的基本概念作简要介绍。

二、土的其他重要特性——术语及概念

1. 土的粒度成分

土是由各种不同大小的颗粒所组成的。按照颗粒的大小，土可以分为漂石、块石粒（粒径大于200mm），卵石、碎石粒（20~200mm），砾石粒（2~20mm），砂土质（0.05~2mm），粉土质（0.005~0.05mm），粘土质（小于0.005mm）。土按其各种组成成分所占重量百分比，可分为砾石质土类、砂土类、亚砂土类、粉土类、亚粘土类、粘土类等6种。每一种土按其粒度成分，还可以进一步作出更为详细的分类（例如砂土可以分为粗砂、中砂、细砂、极细砂、粉质砂土，亚粘土可分为轻亚粘土、重亚粘土等）。土按粒度成分的基本分类见表1-2。

2. 土的含水量

土的含水量 W 是土中水分的质量 g_2 与土的质量 g_1 （干质量）比值的百分数：

$$W = \frac{g_2}{g_1} \times 100\%$$

3. 土的天然重度和干容重

土的天然重度 γ 是土在天然状态（自然含水量）下，土的重力 W 与其所占体积 V 之比：

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

它与土的矿物成分、孔隙度、含水量等因素有关，一般在 $15 \sim 20 \text{ kN/m}^3$ 之间。

土的干容重 γ_s 是土固体颗粒部分的重力 g_s 与土的总体积之比：

$$\gamma_s = \frac{g_s}{V}$$

在工程上常把干容重作为评定土体紧密程度的标准。

4. 土的塑性

土在外力作用下改变形状，并在外力除去后仍然保持这一形状的能力称为土的塑性。通常粘性土属于可塑性土，而砂和砾石则为非塑性土。

含水量对粘性土的可塑性有着重要影响。当含水量大于一定界限时，粘性土会呈现某种流动状态。这一含水量极限即称为粘性土的流动界限（液限）或称塑性上限。当含水量小于某一界限时，则粘性土会失去压延性而变成硬性的固体状态。这一含水量极限即称为粘性土的压延界限（塑限）或称塑性下限。

含水量的流动界限是用下述方法测定的。当重为 0.76 N 、锥顶为 30° 角的圆锥体，将其尖顶接触土，在其自重作用下经过5s沉入土中深度达 10 mm 时，这一含水量即作为土的流动界限，用符号 W_L 表示。

压延性界限的测定法是：当土团被碾成 2 mm 厚的薄带时，土开始碎裂，则这一含水量即为土的压延性界限，用符号 W_p 表示。

随着含水量的不同，粘性土呈现不同的物理状态：当 $W > W_L$ 时称为流动性土；当 $W_p < W < W_L$ 时称为塑性土；当 $W < W_p$ 时称为硬质土。

将 $W_L - W_p = I_p$ 称为土的塑性指数。塑性土按其 I_p 大小又可分成若干类：高塑性土（粘土）、塑性土（亚粘土）和低塑性土（亚砂土），见表1-3。

5. 土的粘着性

土的粘着性是指土粘附在其他物体上的能力。当粘性土的含水量增加到一定程度后(这一含水量称作粘着界限 W_n)，土开始具有粘附在不同物体上的能力。土的粘着性的指标是含水量的粘着界限 W_n 和比粘着力 P_n 。比粘着力 P_n 是使单位面积金属片与土脱离所需要的力。对于粘土， P_n 约等于 $7000 \sim 8000 \text{ N/m}^2$ ，对于亚粘土， P_n 约等于 $5000 \sim 7000 \text{ N/m}^2$ 。

土的粘着性是大部分塑性土，在含砂土质较少而又有适当的含水量时所共有的特性。它会增加铲掘阻力和减少工作装置的有效容量。

6. 土的自然坡度角 φ

土的自然坡度角 φ 是堆积散状土时自然形成的堆积角。 φ 值与土的内摩擦力和粘聚力有关。对于非粘性土，自然坡度角 φ 即等于干土的内摩擦角 ϕ 。各种土在不同状态时的自然堆积角列于表1-4。

7. 土与钢、土与土的摩擦系数 μ_1 和 μ_2

在进行土对工作装置的阻力计算时，可由表1-5选取。

8. 土的松散系数 K

土的松散系数 K ，是指同一重量的土在挖松之后，其体积 V_0 与挖松前那种自然密实状态的体积 V_n 之比：

$$K = \frac{V_0}{V_n}$$

可由表1-6中选取。松散系数 K ，分为初始松散系数和残余松散系数两种，前者为刚挖松情况的数据，后者为挖松后经过若干时间，在自重、风、雨等因素作用下略有密实后的数据。这一点在使用时应予以注意。

9. 土的粘聚力 C 、内摩擦角 ϕ 和重度 γ 列于表1-7和表1-8中。

10. 土的支承能力

土的表面能够支承住机器的行走机构而不下陷的能力，可用最大容许压力 P_a 表示。 P_a 之值可由表1-9选取，它是由允许行走机构在土中沉陷 $6 \sim 12 \text{ cm}$ 的条件决定的。

11. 土的密实度

土的密实度是表示土质密实程度的一项机械特性。它可用土的容重、空隙比等物理量来表示。但是在取出土样后，能够正确无误地保持它的原始状态往往比较困难，因此通常采用现场快速测定土的相对密实度：

(1) 圆锥指数 将一顶角为 30° 的圆锥压头以大约 1.83 m/min 的速度压入土内，至一定深度时，在圆锥投影面上单位面积所需之力称为圆锥指数。它随压入深度而变。测定圆锥指数的仪器称作圆锥贯入计，其型号和参数列于表1-10。

(2) 冲击指数 将面积为 1 cm^2 的圆形平压头，在每次 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 冲击功的作用下，将压头打入土中透 10 cm 深度时，所需冲击次数称为冲击指数。测定冲击次数的仪器称为动载贯入计(或称冲击器)。表1-11是利用冲击指数来表示土的密实程度，进行土分级的例子。

12. 土的孔隙度

土的孔隙度是指在土体中，被水或空气所占的体积空间 V_v 与土的总体积 V 的百分比：

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$$

§ 1-3 土的切削理论

土的切削理论所讨论的基本问题是：

分析各种类型的土在切削元件的作用下的应力状态、破坏形式和破坏的规律性；

寻求一数学表达式，用以对土的切削阻力进行解析求解和预测，并分析影响切削阻力的诸因素。

早期的土切削理论存在着两种极端倾向：一种是根据大量切削试验获得土的切削比阻力值（按切削元件的切削深度和切削宽度，求出切土的断面面积，再根据测得的总切削阻力除以断面面积，就得出单位面积上的切削阻力，即比阻力），如表1-1所示。另一种是纯理论分析，即所谓的楔形理论。前者仅仅是一种试验数据，虽然在铲土运输机械设计上有参考价值，但还不能作为切削理论，因为它没能反映出土切削的物理本质；后者虽然理论性很强，但却脱离具体的土的参数，又很难用试验加以验证。

近年来土的切削理论象“机器—地面系统力学”一样获得了新发展，出现了一系列的新学说，有的大体上符合试验结果；但是由于土这种物质机械特性十分不稳定，若要使切削理论完全与试验结果吻合是十分困难的。但是科学在不断发展，科研手段在不断完善、各科知识不断相互渗透，只要坚持不懈努力，问题一定会得到解决的。

一、土的破坏形式及其应力状态

研究土在切削元件的作用下的破坏形式具有重要意义，抓住土破坏形式及其破坏的规律性，是学习和研究土的切削理论的基础。

铲土运输机械工作装置的切削元件，通常是一个做成刃口的平板。将它置于一定角度（切削角），在前进过程中插入土中一定深度进行切削，在切削过程中土被破坏而形成切屑。

土的破坏形式取决于土的种类、湿度和切削深度^[20]，大体上有三种类型：塑性指数 I_p 高的粘土和松散状的土呈流动型破坏（图1-4a）；塑性指数低的粘土和硬而密实土呈剪裂型破坏（图1-4b）；塑性指数较高的粘土在小切削角（ δ 较小）时呈流动型破坏，而在大切削角（ δ 较大）时呈断裂型破坏（图1-4c）。

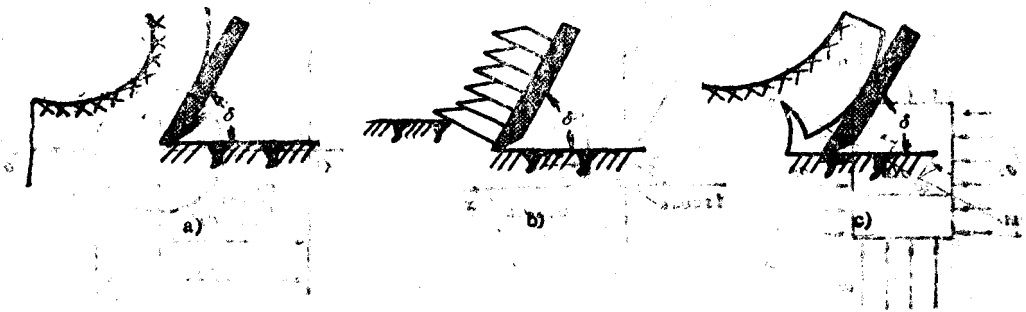


图1-4 土的破坏形式

a) 流动型 b) 剪裂型 c) 断裂型

3-1图

理论和实践都证明：土体在受压缩主应力的作用下，是沿一定方向的剪切面发生破坏的。各种特性的土在被剪切破坏时，剪切面的方向和压缩主应力的大小都不一样，这取决于土的物理机械特性。

对土的应力状态进行理论分析，可对上述问题给出明确的答案。

假设从土体内取出一正六面体的土块，在其两两相对的平面上作用有主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ，这是已知的三维空间的主应力。若 σ_1 为最大主应力， σ_2 为最小主应力，则破坏总是首先在最大与最小主应力所决定的平面内发生；同样，若 σ_3 为最小主应力，则破坏将首先在 σ_1 和 σ_3 所决定的平面内发生。这样，问题的讨论即由三维空间转化为二维空间的平面问题；实践证明这是正确的。

若土体受主应力 σ_1 和 σ_2 的作用，且 $\sigma_1 > \sigma_2$ 。现在要想知道的是在任一斜面 $m-n$ 上某一点处的法向应力和剪切应力的情况。这任一斜面 $m-n$ 将土体割成两个三角形的块，把下面的一小块单独拿出来（图1-5）作为脱离体来讨论。在这个三角形的单元体上，已知的 σ_1 和 σ_2 必由作用在斜面上的法向应力 σ 和剪切应力 τ 所平衡，根据 $\sum x = 0$ 和 $\sum y = 0$ 的平衡条件，则有

$$\left. \begin{aligned} \sigma ds \sin \alpha - \tau ds \cos \alpha - \sigma_2 ds \sin \alpha &= 0 \\ \sigma ds \cos \alpha + \tau ds \sin \alpha - \sigma_1 ds \cos \alpha &= 0 \end{aligned} \right\}$$

式中 α ——斜面 $m-n$ 与 x 轴的夹角。

求解该联立方程得

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

由式(1-2)可见，任一斜面上的 σ 和 τ 之值均为 α 之函数。这种应力状态分析法，是建立在土体破坏之前处于应力—应变的线性变化的基础上的，即建立在所谓的弹性土体的假设基础上，这对于获得一般解是可以的。况且图1-2所示有关内容已经说明，在曲线A或B达到峰值之前也确属弹性体，并且在峰值时确亦发生初始失效。

式(1-2)所对应的图形，是距坐标原点有一段距离的、以 $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ 为半径的圆，即称作莫尔圆（图1-6）。莫尔圆上的任意一点，表示土体内某斜面上的 σ 和 τ 的数

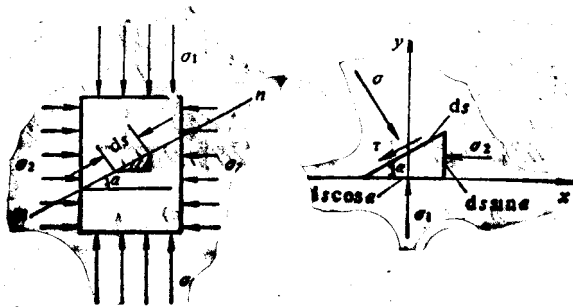


图1-5 土内应力状态分析

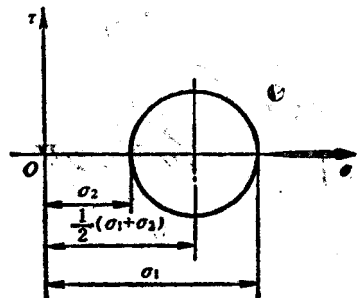


图1-6 莫尔应力圆

值以及该斜面的倾角 α 。相反，欲知某一角度为 α 的斜面上的应力 σ 和 τ ，即可在莫尔圆上找到。

三、土体的极限平衡状态

式 (1-1) 和式 (1-2) 表示土体应力状态的两种不同情况：式 (1-1) 是根据土的剪切试验所测得的强度极限值得到的数学模型。而式 (1-2) 则是描绘土体内某点上的应力状态，其应力值并未达到极限值。这种区别必须明确。将图 1-3 和图 1-6 绘于同一坐标上，便如图 1-7 所示。很明显，莫尔圆可能与直线相切，也可能不相切。如果相切，则表示土体的应力达到了极限状态，否则应力没有达到极限状态。如果人为地改变 σ_1 或 σ_2 的值，例如维持 σ_1 不变而降低 σ_2 之值，则莫尔圆增大，直至与直线 $\tau' = C + \sigma \operatorname{tg} \alpha$ 相切为止。这时在虚线表示的莫尔圆上的各点中，只有 M' 点所代表 τ 值达到 τ' 值而处于极限平衡状态。 $\angle \sigma_1 O' M' = 2\alpha = 90^\circ + \phi$ ，因此

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (1-3)$$

它是滑移面与大主应力作用面所夹的角度。而滑移面与大主应力作用线所夹的角度为

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\phi}{2} \quad (1-4)$$

可见，只要知道大小主应力 σ_1 和 σ_2 的作用方向和土的内摩擦角 ϕ ，即可知道剪切滑移面的方向 (图 1-8)。

通常把极限平衡状态称作郎肯 (Rankine) 状态。

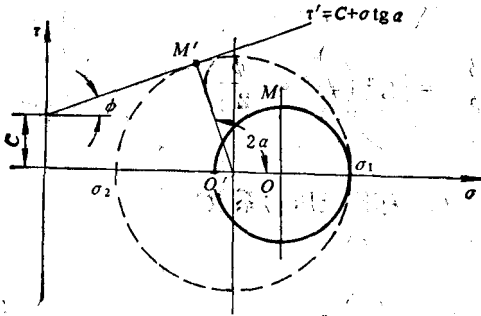


图 1-7 极限平衡图解

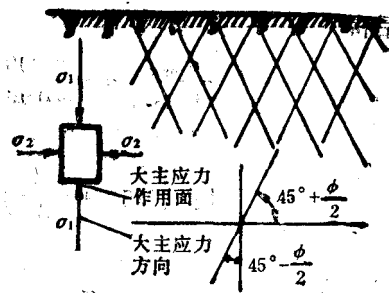


图 1-8 土体剪切滑移面方向

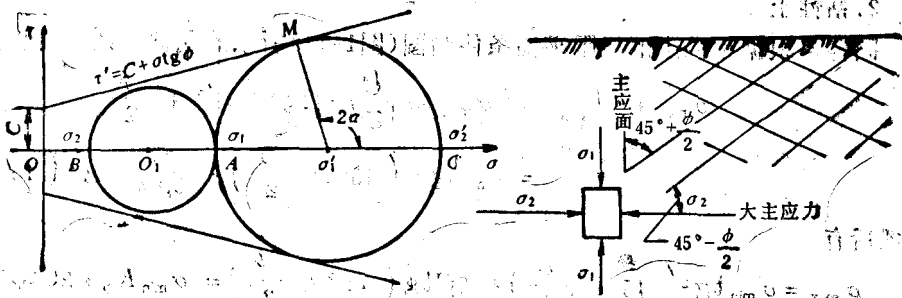


图 1-9 土的滑移面方向的变化

与图1-7所示的情形相反, 当维持 σ_1 不变而增大 σ_2 至 σ'_2 时(图1-9), 形成一个新的莫尔应力圆, 其圆心为 O'_1 , 它与 $\tau' = C + \sigma \operatorname{tg} \phi$ 线相切于点 M , 此时又达到了新的极限平衡状态。大主应力 σ_2 为水平作用方向, 它的作用面为垂直方向, 滑移面与大主应力作用面之间的夹角仍然为 $\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ 。实际上 σ_1 和 σ_2 谁为大小主应力, 只改变了滑移面的方向, 而本质却未发生任何改变。

三、极限平衡状态时大小主应力的关系

由上面的讨论可知, 只有当 σ_1 和 σ_2 之间的比例达到一定值后, 土体才能达到极限平衡状态。这种比例关系取决于土参数 C 和 ϕ 。

1. 无粘性土

无粘性土的极限平衡状态如图1-10所示。从其几何关系可见:

$$\frac{O_1 M}{O O_1} = \sin \phi$$

因为

$$O_1 M = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

$$O O_1 = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$$

所以

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \sin \phi$$

因此有

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_{\max} \sin \phi + \sigma_{\min} \sin \phi$$

整理后得

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{\sin 90^\circ + \sin \phi}{\sin 90^\circ - \sin \phi} = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

令

$$\operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = K_0 \quad (K_0 \text{ 称作土压力系数})$$

则

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = K_0 \quad (1-5)$$

可见, 最大与最小主应力之比满足式(1-5)时, 无粘性土(砂土)即可达到极限平衡状态, 显然这个比值是土内摩擦角的函数。

2. 粘性土

同样, 根据粘性土的极限平衡条件简图(图1-11)所示的几何关系, 可直接写出:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} + \frac{C}{\operatorname{tg} \phi} &= \left(\sigma_{\min} + \frac{C}{\operatorname{tg} \phi} \right) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \\ &= \sigma_{\min} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + \frac{C}{\operatorname{tg} \phi} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \end{aligned}$$

整理后有

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2C \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \sigma_{\min} K_0 + 2C \sqrt{K_0}$$

(1-6)