

高等学校试用教材

工程机械性能

(工程机械制造与维修专业用)

郑训 主编
刘杰 主审
朱尚文



人民交通出版社

高等学校试用教材

Gongcheng Jixie Xingneng

工 程 机 械 性 能

(工程机械制造与维修专业用)

郑 训 主编
刘 杰
朱尚文 主审

11/20/15/

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书是研究公路工程机械在作业过程中,施工机械与土壤(路基、路面)之间的相互关系,机械的使用性能和如何正确操作运用。主要包括:土壤的物理性能;轮式和履带式公路工程机械的行驶原理;公路工程机械的牵引性、经济性、制动性、稳定性、转向性及公路工程机械在特殊条件下的使用等。

本教材根据培养应用型人才为目标,理论以够用为度,密切联系生产实际。除供本专业和与本专业有关的师生作教材外,还可供广大公路工程机械有关的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械性能/郑训,刘杰主编.-北京:人民交通出版社,
1998.7

ISBN 7-114-02942-X

I. 工… II. ①郑…②刘… III. 道路工程-工程机械-机械
性能 IV. U415.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 19126 号

高等学校试用教材

工 程 机 械 性 能

(工程机械制造与维修专业用)

郑 训 主编

刘 杰

朱尚文 主审

责任印制:孙树田 版式设计:刘晓方 责任校对:刘高彤

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京通州区京华印刷制版厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:10.25 字数:253 千

1998 年 7 月 第 1 版

1998 年 7 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—3000 册 定价:13.00 元

ISBN 7-114-02942-X

U · 02103

前 言

我国工程机械行业已有一定基础，尤其是在改革开放政策的推动下，高等级公路大量兴建，引进并吸收外国的先进技术，使我国的工程机械行业有了进一步的发展。

《工程机械性能》是研究公路工程机械在作业过程中土壤（路基、路面）与施工机械之间的相互关系、机械的使用性能及其正确使用。主要内容包括：土壤的物理性能；轮式和履带式公路工程机械的行驶原理；公路工程机械的牵引性、燃料使用经济性、制动性、行驶和作业时的稳定性、转向性、作业性；公路工程机械特殊条件下使用等。

如何分析、评价一台公路工程机械的牵引性（牵引力、牵引功率、牵引效率等）的好坏，如何通过正确使用这些机械，使其更好地发挥公路工程机械的牵引性能，将直接关系到公路工程机械的生产率及公路工程的施工质量。本教材是以此为核心取舍素材编写的。教学过程中应根据培养应用型人才为目标，理论以够用为度，密切联系生产实际，因材施教等教学原则，充分发挥公路工程机械使用性能为主线，合理安排教学内容，并可酌情增减。

本书是以 1995 年夏黑龙江交通高等专科学校、辽宁交通高等专科学校、南京交通高等专科学校、济南交通高等专科学校等四校沈阳协作会议审定的工程机械运用专业教学计划及本课程教学大纲为依据而编写的。

本书共分两篇：第一篇公路工程机械性能（第一～三章刘 杰执笔，第四、五章郑 训执笔，第六～八章李茂福执笔）；第二篇公路工程机械使用（第九章、第十章王东胜执笔）。全书由郑 训、刘 杰主编，朱尚文主审。

由于时间仓促，水平有限，书中定有错漏，敬请广大师生提出宝贵意见。

编 者

1997 年 9 月

目 录

前言

第一篇 公路工程机械性能

第一章 土壤的物理力学性能	1
第一节 土壤的物理性能.....	1
第二节 土壤的垂直载荷与沉陷的关系.....	6
第三节 土壤的剪切应力与位移的关系.....	7
第二章 履带式公路工程机械行驶原理	9
第一节 履带式机械行驶原理.....	9
第二节 履带式机械行走机构的运动分析和受力分析	10
第三节 履带式机械的行驶阻力	13
第四节 履带式机械的附着性能	15
第三章 轮式公路工程机械行驶原理	19
第一节 轮式机械行走机构的运动分析	19
第二节 轮式机械行走机构的受力分析	23
第三节 车轮的滚动阻力	24
第四节 轮式机械的附着性能	26
第五节 轮式机械受力分析及运动分析	28
第四章 公路工程机械的牵引性	33
第一节 牵引平衡	33
第二节 牵引特性	37
第三节 动力特性	54
第五章 公路工程机械燃料使用经济性	58
第一节 施工机械燃料使用经济性	58
第二节 运输机械燃料使用经济性	59
第六章 轮式机械的制动性	66
第一节 制动性的评价指标	66
第二节 制动时车轮受力分析	66
第三节 轮式机械的制动效能	69
第四节 制动时轮式机械的稳定性	71
第五节 前、后制动器制动力的比例关系	73
第七章 公路工程机械作业稳定性	78
第一节 公路工程机械坡道作业稳定性	78

第二节	轮式机械转向特性	86
第三节	轮式机械转向轮的振摆与稳定效应	92
第八章	公路工程机械转向性	95
第一节	履带式机械转向原理	95
第二节	轮式机械转向原理	104

第二篇 公路工程机械使用

第九章	公路工程机械作业性	111
第一节	概述	111
第二节	典型公路工程机械作业性	112
第三节	典型公路工程机械技术使用	129
第十章	公路工程机械特殊条件下的使用	151
第一节	走合期的运用	151
第二节	低温、高温条件下的使用	152
第三节	坏路和无路条件下的使用	155
第四节	高原和山区条件下的使用	156

第一篇 公路工程机械性能

本篇主要介绍土壤的物理性能，轮式和履带式公路工程机械的行驶原理、牵引性、燃料使用经济性、制动性、行驶与作业稳定性、转向性等内容。

第一章 土壤的物理力学性能

土壤是公路工程机械的作业对象或支承基础，它的性能影响甚至决定着公路工程机械的各种使用性能。为了便于分析公路工程机械行走机构与土壤之间的相互作用，以及公路工程机械在各种土壤条件下的使用规律，在此首先介绍土壤的物理力学性能、土壤垂直载荷与沉降的关系，以及土壤剪切应力与其位移的关系。

第一节 土壤的物理性能

一、土壤的粒度和级配

公路工程所涉及的土壤，在一般情况下由土粒、水和气体等三相物质组成。有时土粒间的孔隙全部被水充满，形成饱和土壤；或土粒间的孔隙中只存在着空气，形成无水的干土壤。土壤的含水量对土壤的状态与性质有着明显的影响。

土壤的骨架由各种不同尺寸的土粒所组成。按照粒度大小土壤可分为：漂石及石块（粒径 $>200\text{mm}$ ）、卵石及碎石（粒径为 $20\text{mm}\sim 200\text{mm}$ ）、砾石（粒径为 $2\text{mm}\sim 20\text{mm}$ ）、砂土（粒径为 $0.05\text{mm}\sim 2\text{mm}$ ）、粉土（粒径为 $0.005\text{mm}\sim 0.05\text{mm}$ ）、粘土（粒径 $<0.005\text{mm}$ ）。根据组成成分的重量百分比，土壤则可分为砾石质土类、砂土类、亚砂土类、粉土类、亚粘土类、粘土类等六种。

实际上，土壤多半是不同粒度土粒的混合物，这种混合土壤的性质取决于不同粒度土颗粒的相对含量。确定土颗粒组成相对含量的方法称颗粒分析试验。公路工程中实用的颗粒分析方法有筛分法和比重计法两种。筛分法适用于粒径大于 0.1mm 的土壤，比重计法适用于粒径小于 0.1mm 的土壤。若土壤中同时含有大于及小于 0.1mm 的土粒时，则两种方法并用。

土壤中的各级土粒组合情况，用其含量的百分数表示，称为土壤的颗粒级配。为了直观起见，常用颗粒级配曲线表示，如图 1-1 所示。

从颗粒级配曲线可以看出土粒的组合范围、各种土粒在组合中的含量百分数及颗粒级配的均匀程度。曲线平缓则说明土壤中各种颗粒都有、颗粒不均匀，土壤级配良好；曲线较陡则表示土粒均匀，土壤级配欠佳。土壤颗粒均匀程度通常用不均匀系数 K 表示：

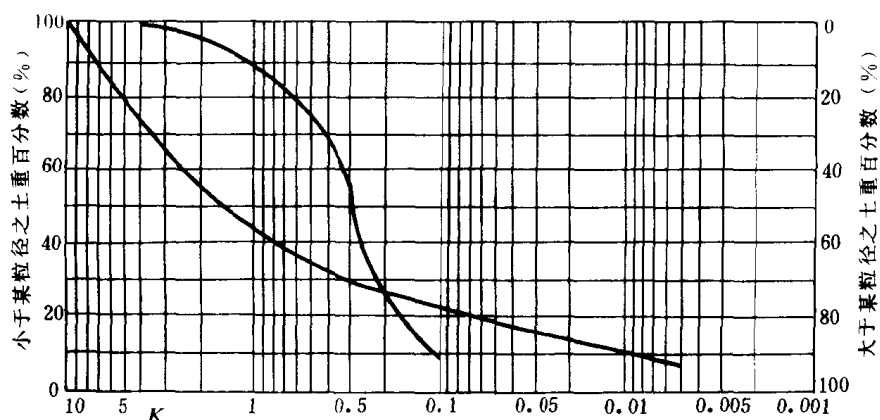


图 1-1 土壤的颗粒级配曲线

$$K = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad 1-1$$

式中： d_{60} ——限定粒径，土壤中小于该粒径的颗粒占土壤总质量的 60%；

d_{10} ——有效粒径，土壤中小于该粒径的颗粒占土壤总质量的 10%。

一般来说， K 值愈大，土壤的级配曲线愈平缓，土壤愈不均匀。公路工程上将 $K > 5$ 的土壤称为不均匀土。

二、土壤的含水量

土壤的含水量 W 是土壤中水分质量与土壤颗粒质量（干质量）的百分比：

$$W = \frac{g_w}{g_s} \times 100\% \quad 1-2$$

式中： g_w ——土壤中水分质量，kg；

g_s ——土壤颗粒质量，kg。

三、土壤的天然密度和干密度

土壤的天然密度（简称土壤密度） γ_o 是土壤在自然状态（自然含水量）下，土壤的质量与其体积之比：

$$\gamma_o = \frac{g_o}{V_o} \quad 1-3$$

式中： g_o ——土壤的质量，kg；

V_o ——土壤的体积， m^3 。

土壤的干密度 γ_d 是土壤颗粒质量（干质量）与其体积之比：

$$\gamma_d = \frac{g_s}{v_o} = \frac{\gamma_o}{1 + W} \quad 1-4$$

四、土壤的固体颗粒相对密度和密度

土壤的固体颗粒相对密度 W_s 是土壤干质量与同体积 4℃时的水质量之比：

$$W_s = \frac{g_s}{V_s \gamma_w} \quad 1-5$$

式中： V_s ——质量为 g_s 的土壤颗粒的体积， m^3 ；

γ_w ——4℃时纯水的密度，kg/m³。

土壤的固体颗粒密度 γ_s 是土壤干质量与其体积之比：

$$\gamma_s = \frac{g_s}{V_s} = W_s \cdot \gamma_w \quad 1-6$$

五、土壤的孔隙率和孔隙比

土壤的孔隙率 n 是指土壤的孔隙体积与土壤的总体积之比：

$$n = \frac{V_v}{V_o} \quad 1-7$$

式中： V_v ——土壤的孔隙体积，m³。

土壤的孔隙比 e 是指土壤的孔隙体积与土壤的固体颗粒体积之比：

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad 1-8$$

孔隙率及孔隙比反映了土壤的密实程度，它们之间存在如下关系：

$$n = \frac{e}{1+e} \text{ 或 } e = \frac{n}{1-n} \quad 1-9$$

六、土壤的塑性

土壤的塑性是指土壤在外力取消后仍保持变形的能力。粘性土壤属于可塑性土壤，而砂土和砾石土则为非塑性土壤。

含水量对粘性土壤的可塑性影响如图 1-2 所示。含水量大于某一界限时粘性土壤将显现出某种流动状态，该含水量的极限称为粘性土壤的流动界限（液限），或称塑性上限 W_L 。含水量小于另一界限时粘性土壤则失去压延性而变成硬性的固体状态，该含水量的极限称为粘性土壤的压延界限（塑限）或塑性下限 W_P 。

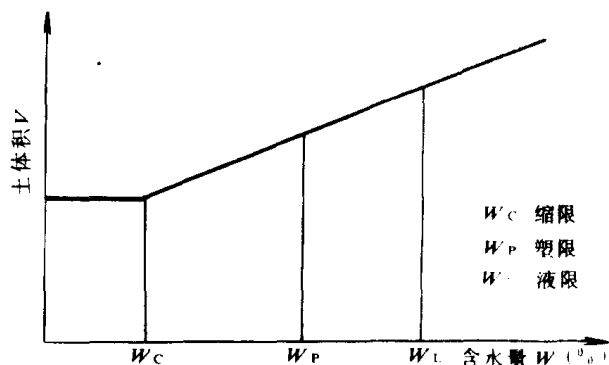


图 1-2 粘性土壤的稠度界限

粘性土壤随其含水量的变化而具有不同的物理状态：含水量小于其塑性下限 W_P 时

时为硬性土壤；含水量介于塑性下限 W_P 与塑性上限 W_L 之间时为塑性土壤；含水量大于塑性上限 W_L 时则为流动土壤。图中 W_C 称为缩限。

塑性土壤按其塑性上下限区间 ($W_L \sim W_P$) 的大小又可分为高塑性土壤（粘土）、塑性土壤（亚粘土）和低塑性土壤（亚砂土）。 $W_L - W_P$ 称为塑性土壤的塑性指数 I_P 。各类塑性土壤的塑性指数 I_P 范围见表 1-1。

各种土壤的塑性指数

表 1-1

土的种类	粘土 (高塑性土)	亚粘土 (塑性土)	亚砂土 (低塑性土)	砂土 (非塑性土)
塑性指数	>17	7~17	1~7	<1

七、土壤的粘着性

土壤的粘着性是指土壤粘附在其他物体上的能力。土壤的粘着性指标是粘着界限 W_H 和比粘着力 C 。粘性土壤的含水量增加到一定数量时开始具有粘附能力,此时的含水量称为粘着界限。使金属片脱离土壤所需的单位面积上的作用力称为比粘着力。粘性土壤的比粘着力约为 $7\text{MPa}\sim 8\text{MPa}$, 亚粘性土壤的比粘着力约为 $5\text{MPa}\sim 7\text{MPa}$ 。

土壤的粘着性增加使铲土运输机械及土方挖掘机械的铲、掘阻力增加,并降低其附着性,减少工作装置的实际容量。

八、土壤的剪切强度

土壤的剪切强度是指在法向力作用下,土壤在滑动面上产生的极限剪切应力 τ_m 。它可视为由两部分组成(见图 1-3):其一,土壤在单位滑动面上的内摩擦力,其数值等于滑动面上的法向应力与土壤的内摩擦系数之乘积 $\sigma\mu_2$;其二,土壤的比粘着力 C 。

土壤的剪切强度可用库仑公式表示:

$$\tau_m = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad \text{N/cm}^2 \quad 1-10$$

式中: C ——土壤的比粘着力, N/cm^2 ;

σ ——滑动面上的法向应力, N/cm^2 ;

φ ——土壤的内摩擦角, $^\circ$ 。

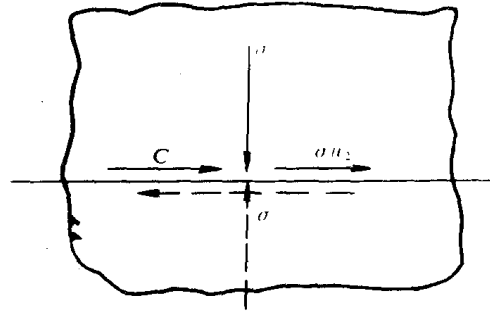


图 1-3 土壤剪切时的应力平衡

九、土壤的自然坡度角

土壤的自然坡度角 φ_0 是指松散的土壤堆积时自然形成的坡度角。自然坡度角 φ_0 值与土壤的内摩擦性、粘着性有关。非粘性土的自然坡度角 φ_0 等于它的内摩擦角 φ 。各种土壤的自然坡度角 φ_0 见表 1-2。

土壤的自然坡度角 ($^\circ$)

表 1-2

土壤的种类 土壤状态	碎石	砾石	砂 石			粘 土		轻亚 粘土	植物土
			粗砂	中砂	细砂	肥土	贫土		
干	35	40	30	28	25	45	50	40	40
湿	45	40	32	35	30	35	40	30	35
饱和	25	35	27	25	20	15	30	20	25

十、土壤与钢的摩擦系数

土壤与钢的摩擦系数 μ 是影响公路工程机械作业性的重要因素。 μ 值可用下式估算:

$$\mu = (0.75 - 1) \operatorname{tg} \varphi \quad 1-11$$

十一、土壤的松散系数

土壤的松散系数 K_P 是指土壤松散状态时的体积 V_P 与自然密实状态时的体积 V_0 之比:

$$K_P = \frac{V_P}{V_0} \quad 1-12$$

各种土壤的松散系数 K_p 见表 1-3。

土壤的松散性系数

表 1-3

土的等级	土 的 种 类	松 散 性 系 数 K_p	
		刚翻松后	经若干时间后
I	砂土、亚砂土	1.08~1.17	1.01~1.02
	植物土、泥煤	1.20~1.30	1.03~1.04
II	黄土性亚粘土、翻松的湿黄土、粒径 $<15\text{mm}$ 的砾石	1.14~1.25	1.03~1.05
III	肥粘土、重亚粘土、大块的砾石、自然含水量的黄土	1.24~1.30	1.04~1.07
IV	重粘土、带碎石的亚粘土、硬质黄土、软质泥灰岩	1.26~1.32	1.06~1.09
	蛋白土、硅藻石	1.33~1.37	1.11~1.15
V	硬质泥灰岩、软质带裂缝的岩石	1.30~1.45	1.10~1.20
VI	岩石、矿石	1.40~1.50	1.20~1.30

十二、土壤的挤压应力系数和承载能力

当土壤的变形较小 ($<1\text{cm}$)，承载平板直径大小的影响可以忽略不计时，土壤的法向接触应力 P 与变形量 z 之间存在着如下关系：

$$P = P_0 Z \quad 1-13$$

式中： P_0 ——土壤的挤压应力系数（土壤每下沉 1cm 所需要的挤压应力）。

土壤的支承能力用支承面上最大允许压力 P_d 表示。 P_d 值是在允许公路工程机械的行走装置沉入土壤 $6\text{mm} \sim 12\text{mm}$ 时测定的。各种土壤的 P_0 、 P_d 值见表 1-4。

各种土壤的 P_0 和 P_d 值

表 1-4

土 壤 的 种 类	P_0 (N/cm^2)	P_d (N/cm^2)
沼泽土	1.80~2.50	20~30
饱和含水量的粘土、翻松的砂土	2.50~3.50	30~50
粗砂、中等密度实度的砂土	3.50~6.50	40~60
中等密实度的粘土、湿的密实粘土	5.00~6.00	60~70
中等含水量的密实粘土、泥灰岩、湿黄土	7.00~10.00	80~100
干燥的密实粘土、黄土、泥灰岩	11.00~13.00	110~150

十三、土壤的密实度

土壤的密实度表示土壤的密实程度，常用土壤的天然密度 γ_0 、干密度 γ_d 、固体颗粒相对密度 W_s 、固体颗粒密度 γ_s 及孔隙率 e 等物理特性参数来表示。但由于在取出土壤试样时保持其原始状态比较困难，在公路施工现场常用静载和动载等快速方法来测定土壤的相对密实度。例如，用圆形平板或圆锥压头在一定的速度下压入土壤至一定深度时，压头上所承受的土壤反力；或在一定的冲击能作用下，使压头压入土壤至一定深度时所需要的冲击次数，作为表示土壤相对密实度的指数。该指数不仅反映了土壤的密实程度，而且还综合反映了土壤的物理机械特性，在研究公路工程机械施工时可作为土壤的条件指标。这些指标可用来表示机械在地面上的通过性能（土壤的可行驶性），土壤的可切削性等。目前常用的表示土壤相对密实

度的指数有圆锥指数和冲击指数两种。

1. 圆锥指数

圆锥指数是指将一顶角为 30°的圆锥压头、以大约 1.8m/min 的速度压入土壤一定深度所需要的单位圆锥投影面积上的力。圆锥指数是随压入深度而变化的，所以也可以用圆锥指数随压入深度变化的关系曲线来表示土壤相对密实度，如图 1-4 所示。

2. 冲击指数

冲击指数是指将一面积为 1cm² 的圆锥压头，在每次 10J 冲击能的作用下，压头压入土壤 10cm 深度所需要的冲击次数。不同土壤的冲击指数见表 1-5。

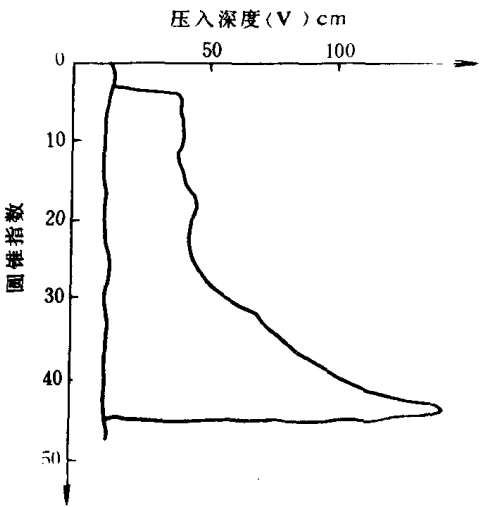


图 1-4 圆锥线图

各种土壤的冲击指数 表 1-5

土壤等级	土 壤 种 类	比切削阻力 N/cm²	冲击指数
I	砂土、亚砂土、不含夹杂物的轻质亚粘土、粉质土	<5	0~7
II	中等含水量不含夹杂物的亚粘土、中等和较高含水量的轻质粘土	5~10	8~15
III	低含水量的密实亚粘土、含砾石和卵石的重亚粘土、中等含水量的粘土	10~15	16~21
IV	密实的粘土、干燥的黄土、轻质的泥灰岩、未胶结的磷钙土和砾岩	15~25	24~30

第二节 土壤的垂直载荷与沉陷的关系

公路工程机械在作业或行驶过程中，土壤受到压缩。由于土壤是固体、液体、气体三相组成的复合材料，很难用单纯的理论分析。通常，用实验方法建立某些经验公式来表示机械与土壤的相互作用关系。施加均布载荷于一块代表充气轮胎或履带接地面积的平板，其静止沉陷量 Z 和压力 P 之间的关系如图 1-5 所示。根据多次试验的结果得出图中曲线，该曲线可用以下经验公式表示：

$$P = KZ^n \quad \text{N/cm}^2 \quad 1-14$$

式中： K ——土壤的变形模数；
 n ——土壤的变形指数。

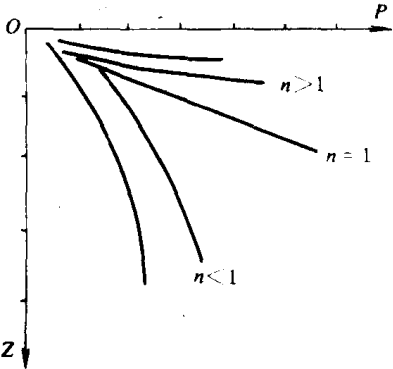


图 1-5 土壤的沉陷量与压力关系曲线

图中曲线根据 n 值分为两组： $n < 1$ 时为软弱土壤，在重复载荷作用下可能碎裂而失去强度； $n > 1$ 时为硬实土壤，在重复载荷作用下变得结实而坚硬。

从事土壤—机械行走机构力学研究的加拿大著名学者 M·G·Bekker 用带状载荷进行一系列土壤压缩试验后指出，土壤的变形模数 K 值与土壤的性质和载荷板的宽度有关。他建

议，载荷板单位面积上的压力 P 与其静止沉陷量 Z 之间的关系用下式表示：

$$P = \left(\frac{K_c}{b} - K_\varphi \right) \times Z^n \quad \text{N/cm}^2 \quad 1-15$$

式中： K_c ——土壤变形的内聚模量；

K_φ ——土壤变形的摩擦模量；

b ——载荷板的宽度，cm。

Bekker 的试验表明，对于均匀土壤，试验平板尺寸对 K_c 、 K_φ 及 n 值没有影响。但由于土壤的不均匀性，为提高试验的准确性，平板宽度或半径不能小于 5cm，压入速度为 2.5cm/s ~ 5cm/s。

第三节 土壤的剪切应力与位移的关系

土壤在剪切力的作用下，土粒或两部分土壤之间有相对位移趋势，甚至产生明显的位移，如图 1-6 所示。这种相对位移受土壤抗剪强度的制约。土壤在剪切力作用下开始破坏时的抗剪反作用力 τ_m ，称为土壤的最大抗剪强度。土壤抗剪强度是决定公路工程机械施工作业时能否发挥最大牵引力的主要因素。同一种土壤的抗剪强度，随其含水量及被压实的程度不同而变化。现将土壤的抗剪强度表达方式，剪切应力与剪切位移的关系，内聚力和内摩擦系数等问题介绍如下。

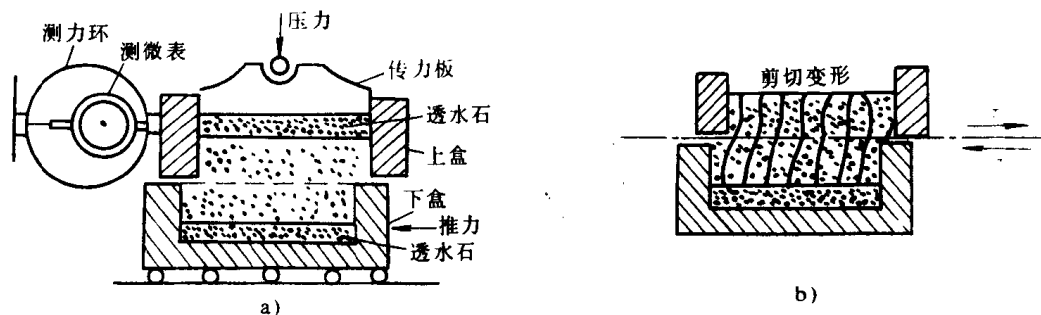


图 1-6 直接剪切示意图

a) 直剪仪；b) 试样的剪切变形

一、库仑剪切强度公式

库仑根据平面直剪试验结果，将土壤的抗剪强度表示为由土壤颗粒间的粘着力和摩擦力两项组成的经验公式，即本章公式 1-10。该式表明，土壤的抗剪强度与剪切面上的垂直压力成正比。该公式可用图 1-7 所示的分解形式表示。

二、剪切应力与位移的关系

土壤的剪切应力与位移的关系如图 1-8 所示。

脆性土壤（如坚实的粘土、冻结的湿土等）剪切应力达峰值后再下降而出现的恒定值，即为剩余剪切应力；塑性土壤（如砂、饱和粘土等）剪切应力达到一定值后基本上保持不变，其曲线上不出现驼峰。它的特点是弹性流动逐渐转变为塑性流动。针对塑性土壤，著名学者 Janosi 提出用指数来表示剪切应力与变形关系的公式：

$$\tau = \tau_m \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{k}\right) \right] \quad \text{N/cm}^2 \quad 1-16$$

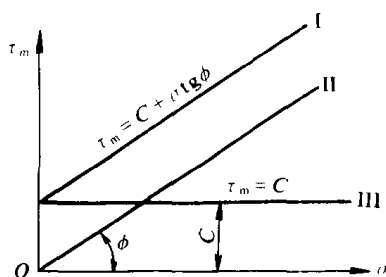


图 1-7 土壤的抗剪强度-压力曲线
I-内聚力及摩擦角均有的土壤；II-内聚力
为零的土壤；III-摩擦角为零的土壤

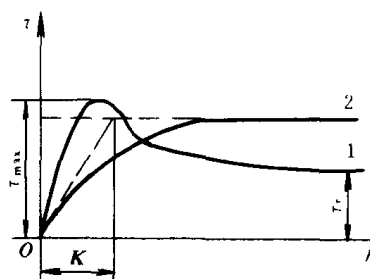


图 1-8 土壤的剪切应力与位移的关系

式中： J ——土壤的位移量，cm；

K ——土壤的水平剪切变形模量，cm。

求 K 值时可对上式微分，求出曲线在原点处切线的斜率为 $\tan \alpha = \tau_m / K$ ， K 值是曲线上原点处的切线与 τ_m 作水平线的交点 A 的横坐标值，如图 1-9 所示。 K 值可作为产生最大切应力时相应的土壤变形量的一个度量，其值取决于土壤的坚硬程度。例如，松砂的 K 值约为 3.5cm，压实后的粘土 K 值约为 0.6cm。

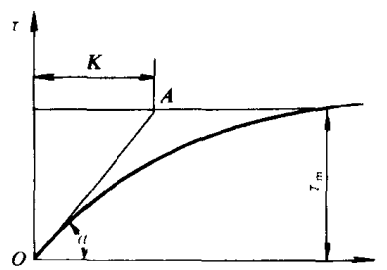


图 1-9 塑性土壤 K 值的确定

三、内聚力与内摩擦系数

土壤内聚力 C 取决于土壤的物理性质和化学性质，尤其与土壤的含水量有密切关系，含水量过高或过低均会使 C 值降低。不同土壤对应于最大内聚力的含水量各不相同。为了使公路工程机械发挥出较好的牵引性，应该使其在含水量适中的土壤上进行作业。

土壤内聚力包括分子内聚力和水膜内聚力。分子内聚力来自颗粒间的相互吸引力。分子内聚力很小，可以忽略不计。水膜内聚力来源于水膜的表面张力作用。

粘性土的内聚力较大，但翻松后的土壤内聚力明显减小。砂土的内聚力很小，几乎等于零。

土壤的内摩擦力是由于土粒表面粗糙、凹凸不平，相互嵌合，各部分相对移动时相互阻滞而引起的。内摩擦角 φ 是表示土壤内摩擦性质的参数，其正切值被称为土壤的内摩擦系数。粘土的内摩擦角 φ 值随含水量增加而减小，一般在 $6^\circ \sim 43^\circ$ 范围内。干砂土的内摩擦角 φ 一般大于 30° 。

第二章 履带式公路工程机械行驶原理

履带式公路工程机械（以下简称为履带式机械）是依靠发动机的动力，通过履带与地面（土壤）的相互作用来实现其作业或行驶的。

本章主要叙述履带式机械驱动力、行驶阻力、附着力的产生，及其相互之间的关系。

第一节 履带式机械行驶原理

一、行驶原理

履带式机械是靠履带卷绕时地面对履带接地段产生的反作用力推动前进的。为了便于说明履带式机械的行驶原理，将其行走机构的履带分成几个区段，如图 2-1 所示：1—3 为驱动段；4—5 为上方段；6—8 为前方段；8—1 为接地段或称支承段。

履带式机械行走时其驱动轮在驱动力矩 M_K 的作用下，对驱动段履带产生拉力 F_K ，其值为

$$F_K = \frac{M_K}{r_K} \quad \text{N} \quad 2-1$$

式中： M_K ——驱动轮的驱动力矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ；

r_K ——驱动轮动力半径， m 。

对履带式机械行走机构来说，拉力 F_K 是内力，它力图将接地段履带从支重轮下拉出，致使地面（土壤）对接地段履带产生水平反作用力，该水平反作用力的合力 F_K 即为履带式机械行驶的驱动力，其方向与履带式机械的行驶方向相同。

发动机的动力经传动系传到驱动轮的过程中存在扭矩损失，损失的程用传动系机械效率 η_m 表示；动力从驱动轮传到履带接地段时也存在损失，此损失程度可用履带驱动段效率 η_l 表示。因此履带式机械的实际驱动力 F_t （也称为切线牵引力）可表示为：

$$F_t = \frac{M_e i_m \eta_m \eta_l}{r_K} \quad \text{N} \quad 2-2$$

式中： M_e ——发动机有效扭矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ；

i_m ——传动系总速比。

为了进一步说明履带式机械是在 F_t 作用下行驶的，在驱动轮轴线上加上两个大小相等、方向相反的力 F_K ，如图 2-2 所示。其中一个力与驱动段内的拉力形成一个力偶，其值等于驱动力矩 M_K ；另一个力可分解为平行和垂直于路面的两个分力 F'_K 、 F''_K 。其中水平分力 $F'_K = F_K \cos \psi$ 。同理，将作用在后支重轮上的两个力（驱动段内的拉力 F_K 及土壤的反作用力 F_t ）均平

移到该支重轮轴线上，则可得到一合力 F_Σ 。然后将合力 F_Σ 分解成平行与垂直于路面的两个分

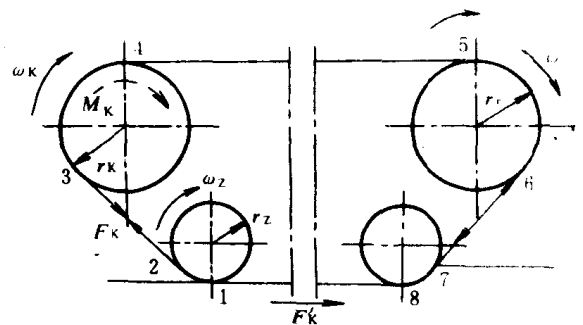


图 2-1 履带式机械行驶原理

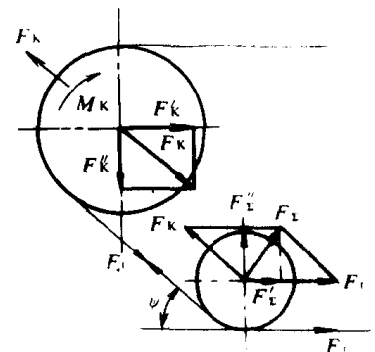


图 2-2 履带式机械驱动力传递简图

力 F'_Σ 和 F''_Σ ，其中 $F'_\Sigma = F_t - F_K \cos \varphi$ 。

推动履带式机械前进的应该是 F'_K 与 F'_Σ 之和，即 $F_K \cos \psi + F_t - F_K \cos \psi = F_t$ 。若履带销和销孔间的摩擦损失可忽略不计，推动履带式机械前进的力 F_t 则等于履带驱动段拉力 F_t ，并不随驱动段履带的倾角 ψ 而改变。但实际上因履带销和销孔间有摩擦存在，故 F_t 比 F_K 要小些。

二、传动系机械效率

发动机的动力经传动系传往驱动轮的损失，主要由离合器的打滑、齿轮啮合的摩擦、油封与轴的摩擦以及齿轮的搅油等原因造成。该损失大小用传动系传动效率 η_m 表示，即

$$\eta_m = \frac{P_K}{P_e} = \frac{M_K \omega_K}{M_e \omega_e} \quad 2-3$$

式中： P_K ——驱动轮驱动功率，kW；

P_e ——发动机有效功率，kW；

M_K ——驱动轮驱动力矩，N·m；

M_e ——发动机有效扭矩，N·m；

ω_K ——驱动轮角速度，1/s；

ω_e ——发动机角速度，1/s。

第二节 履带式机械行走机构的运动分析和受力分析

一、履带式机械行走机构的运动分析

本节仅讨论履带式机械行走机构在水平地面上作等速直线行驶时的运动情况。

履带式机械在水平地面上的直线运动，可以看成其台车架相对于接地段履带的运动和接地段履带相对于地面的滑转运动的合成。根据相对运动原理，台车架与接地段履带的运动速度两者在数量上相等、方向相反。因此，可以通过分析履带对静止的台车架的运动来求出两者之间的相对运动速度。此时的履带以一定的速度围绕驱动轮、导向轮等作卷绕运动，如图 2-3 所示。由于履带是由若干个链轨节所组成，如同通常的链传动一样，即使驱动轮等速旋转，

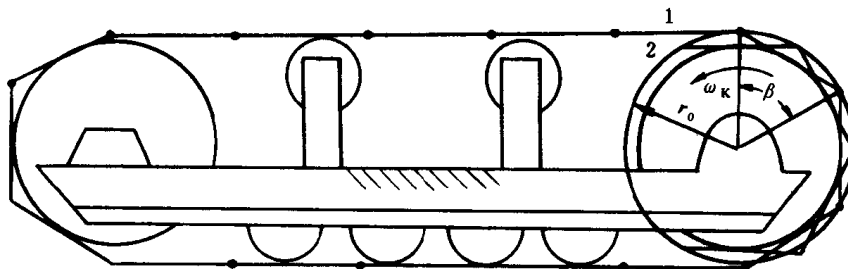


图 2-3 履带与台车架相对运动示意图

履带的卷绕运动是非匀速的。当履带处于图中 1 的位置时，其速度达最大值：

$$V_1 = r_0 \omega_K \quad \text{m/s} \quad 2-4$$

式中： r_0 ——驱动轮节圆半径，m；

ω_K ——驱动轮角速度，1/s。

履带处于图中 2 的位置时其运动速度最小：

$$V_2 = r_o \omega_K \cos \frac{\beta}{2} = V_1 \cos \frac{\beta}{2} \quad \text{m/s} \quad 2-5$$

式中: β ——驱动轮分度角, $\beta = 360^\circ/Z_K$, Z_K 为驱动轮有效啮合齿数。

由此可见, 即使驱动轮等速旋转, 而台车架的相对运动速度以至整个履带式机械的行驶速度是非匀速的, 并且是周期性变化。

履带卷绕运动的平均速度可通过驱动轮每转一周所卷绕的链轨节的总长度来计算:

$$V_m = \frac{Z_K L_t}{2\pi} \omega_K = \frac{Z_K L_t n_K}{60} \quad \text{m/s} \quad 2-6$$

式中: L_t ——链轨节距, m;

n_K ——驱动轮转速, r/min。

若履带与地面之间没有滑移现象, 那么台车架及整个机械相对于接地段履带、地面的运动速度 V_T 就等于履带卷绕运动的速度, 即 $V_T = V_m$ 。此速度被称为履带式机械的理论行驶速度。

由公式 2-6 可见, 若驱动轮有效啮合齿数 Z_K 增加 (β 角减小) 时, 履带卷绕运动速度的波动则减小, 台车架及整个机械的运动趋于匀速, 使履带式机械的振动、噪声减小, 平静性与舒适性提高。

履带式机械行驶及作业时, 即使牵引力没有超过履带与地面的附着力, 履带与地面之间仍存在着微量的滑转, 这是履带板 (特别是履刺) 水平方向挤压土壤的缘故。此时履带式机械的实际行驶速度 V 是台车架相对接地段履带和履带滑转速度的合成速度, 即

$$V = V_T - V_j \quad \text{m/s} \quad 2-7$$

式中: V_j ——履带滑转速度, m/s。

实际行驶速度 V 也可以用单位时间内履带式机械的实际行驶距离表示。

通常用滑转率 δ 表示履带相对地面的滑转程度。它表明由滑转或滑移引起的履带式机械的速度损失。滑转率 δ 用下式表示:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{L_T - L}{L_T} \times 100\% = \left(1 - \frac{L}{L_T}\right) \times 100\% \\ \text{或 } \delta &= \frac{V_T - V}{V_T} \times 100\% = \left(1 - \frac{V}{V_T}\right) \times 100\% \end{aligned} \quad 2-8$$

式中: L_T ——履带式机械在 t 时间内的理论行驶距离, m;

$$L_T = r_K \omega_K t = Z_K L_t / 2\pi \cdot \omega_K t。$$

其中: L ——履带式机械在 t 时间内的实际行驶距离, m。

履带式机械空载行驶时滑转率较小 ($\delta \approx 0$), 此时可以用空载行驶距离 L_o 和行驶速度 V_o 代表其理论行驶距离和行驶速度, 则公式 2-8 可改写为

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{L_o - L}{L_o} \times 100\% \\ \text{或 } \delta &= \frac{V_o - V}{V_o} \times 100\% \end{aligned} \quad 2-9$$

上式在履带式机械的滑转率试验中经常使用。

二、履带式机械行走机构的受力分析

这里仅讨论履带式机械在水平地面上作等速直线行驶时的受力情况。