



普通高等教育规划教材

ongcheng
Jixie

Dimian
Lixue

yu

Zuoye
Lilun

工程机械地面力学 与作业理论

► 杨士敏 傅香如 编著



人民交通出版社
China Communications Press

普通高等教育规划教材

Gongcheng Jixie Dimian Lixue yu Zuoye Lilun

工程机械地面力学与作业理论

杨士敏 傅香如 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要研究工程机械与地面(包括工作介质)相互作用的力学过程。主要包括:绪论、土的物理机械性质、载荷作用下土中的应力分布、极限平衡理论在工程机械地面力学中的应用、车辆载荷作用下土的力学特性、履带式行走机构与地面相互作用理论、轮式行走机构与地面相互作用理论、车辆的通过性和地面的可行性、车辆行走机构的改进、作业介质的物理机械性质、摊铺机与作业介质相互作用理论、压实机械与作业介质相互作用理论、旋转式工作装置与作业介质相互作用理论、冲击式工作装置与作业介质相互作用理论、平移式工作装置与作业介质相互作用理论,共计 15 章。

本书为高等院校工程机械专业本科生和研究生教材,也可作为广大工程机械设计人员、研究人员和施工技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械地面力学与作业理论 / 杨士敏,傅香如编著. —北京:人民交通出版社,2010.5

ISBN 978-7-114-08329-7

I. ①工… II. ①杨…②傅… III. ①工程机械—相互作用(物理)—地面—力学 IV. ①TU6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 053793 号

普通高等教育规划教材

书 名: 工程机械地面力学与作业理论

著 作 者: 杨士敏 傅香如

责任编辑: 韩亚楠

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757963

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 17.5

字 数: 434 千

版 次: 2010 年 6 月 第 1 版

印 次: 2010 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08329-7

印 数: 0001-2000 册

定 价: 35.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

工程机械底盘与工作装置只有和地面及其工作对象(即作业介质,一般为土)相互作用,才能完成其功能。车辆在地面上行驶要靠土来支承,要借助土的反力来发挥推进力,还要用推进力来牵引作业机具进行地面作业,况且大多数工程机械的作业对象就是土,所以工程机械和地面是一个自然的统一体。但是,许多年以来,人们往往把这个统一体分开,孤立地偏重研究车辆本身,即研究发动机理论、材料力学、制造工艺、车辆结构及工作装置的改进等,而很少涉及车辆与地面之间的相互作用问题。对于机器的行驶阻力、牵引性能、通过性以及工作阻力等,都只利用一些安全系数很大的参数来评价。随着科学技术的发展,人们对机器性能的要求越来越高,许多在安全系数掩盖下的未知因素的作用逐渐突出,这就迫使人们去深入研究车辆和地面之间的相互作用过程,于是地面力学这个工程力学领域中的新分支就应运而生了。可想而知,研究地面力学对于改进车辆及工作装置设计所起的作用,和空气动力学对改进飞机设计以及流体动力学对改进船舶设计所起的作用将是同等重要的。

随着我国现代化建设的不断发展,人们对工程质量的要求越来越高,建筑与筑路机械化施工已经成为不可阻挡的潮流,所以,建筑施工机械和公路施工机械在我国现代化建设中正发挥着巨大的作用。我们的祖国正在发生日新月异的变化,在繁忙的建筑工地上,高楼正在耸立,大桥正在飞架,公路、铁路正在延伸,地面上大大小小的工程机械和运输车辆正在忙碌着,到处都可以看到机器和地面(土或其他工作介质)相互作用的现象,到处都能遇到地面机器系统的研究问题。“工程机械地面力学与作业理论”这门学科有着广阔的发展前景,也存在着需要深入探讨的新问题。例如,要提高车辆单位质量的牵引力,只有进一步降低车辆接地压力,这对现有的车辆而言比较困难,因为现有行走装置的形式,限制了接地压力的降低。要提高车辆的牵引性能,必须从根本上改变车辆的形态,而不能只限于几何尺寸上的变更,只有探索新的结构形式,才会使车辆的牵引性能有根本的改变,这就需要我们开阔思路,努力开拓,深入研究,不断完善,使工程机械地面力学与作业理论的研究更上一层楼。

长安大学工程机械学院是我国从事工程机械地面力学与作业理论研究与教学历史最悠久的高等院校,积累了丰富的研究成果和教学经验。本书作者长期从事工程机械地面力学与作业理论,工程机械作业质量控制理论的教学、科学研究

与实践,在查阅了大量资料的基础上,结合作者的一些科研成果,完成了本书的编著工作,旨在起到抛砖引玉的作用,希望能有助于我国地面机械系统力学的发展和工程机械的发展。

本书从工程机械的角度出发,进行了工程机械地面力学与作业理论的研究与分析,主要论述了土的物理机械性质、载荷作用下土中的应力分布、极限平衡理论在工程机械地面力学中的应用、车辆载荷作用下土的力学特性、履带式行走机构与地面相互作用理论、轮式行走机构与地面相互作用理论、车辆的通过性和地面的可行驶性、车辆行走机构的改进、作业介质的物理机械性质、摊铺机与作业介质相互作用理论、压实机械与作业介质相互作用理论、旋转式工作装置与作业介质相互作用理论、冲击式工作装置与作业介质相互作用理论、平移式工作装置与作业介质相互作用理论。

本书对于工程机械的设计、新产品的开发、工程机械新型行走机构和工作装置的研制,具有理论上的指导意义;对于工程机械的选择和使用,也具有实际意义。本书除了可作为高等院校工程机械专业本科生和研究生的教材外,对于广大工程机械设计、研究人员和施工技术人员来说,也是一本有价值的参考书。

本书由长安大学杨士敏教授和解放军工程兵指挥学院傅香如统稿,其中,长安大学杨士敏编著第一、三、四、五、六、七、十一、十二、十四章,解放军工程兵指挥学院傅香如编著第十五章,江苏省交通工程集团有限公司罗岗编著第八章,山西省交通职业技术学院姜婷编著第二、九章,安徽省高速公路总公司陆学元编著第十章,长安大学马登成编著第十三章。全书由杨士敏教授审定。由于我们水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者提出宝贵意见。

本书参阅了一些国内外资料,在此表示感谢,并感谢研究生鲁坦、江珊、唐圆、孙天野、常秋红为本书出版所做的工作。长安大学褚彦军博士对本书提出了一些修改意见,在此一并感谢。

作 者
2010 年 3 月

目 录

1 绪论	1
1.1 地面力学的研究范围	1
1.2 研究地面力学的意义	1
1.3 地面力学的发展概况	2
1.4 地面力学的研究方法	5
2 土的物理机械性质	8
2.1 土的形成与结构	8
2.2 土的组成	11
2.3 土的分类	13
2.4 土的物理性质指标	15
2.5 土的物理状态指标	17
2.6 土的压实性能	21
2.7 土的综合参数	24
3 载荷作用下土中的应力分布	27
3.1 土体的自重应力	27
3.2 集中载荷作用下土中的应力分布	28
3.3 均布垂直线载荷作用下土中的应力分布	31
3.4 均布水平线载荷作用下土中的应力分布	32
3.5 均布条形载荷作用下土中的应力分布	33
3.6 均布矩形载荷作用下土中的应力分布	36
3.7 三角形分布矩形载荷作用下土中的应力分布	38
3.8 均布圆形载荷作用下土中的应力分布	39
3.9 几个问题的修正	39
4 极限平衡理论在工程机械地面力学中的应用	41
4.1 土的强度理论	41
4.2 动载荷作用下土的抗剪强度	47
4.3 土压力理论	48
4.4 极限平衡状态理论的应用	50
5 车辆载荷作用下土的力学特性	55
5.1 土体在垂直载荷作用下的应力—变形关系	55
5.2 土体在水平载荷作用下的应力—变形关系	59

5.3	土的物理值组的结构	61
6	履带式行走机构与地面相互作用理论	65
6.1	履带的接地压力	65
6.2	作业时履带接地压力分布规律的研究	69
6.3	履带式车辆的外部行驶阻力	73
6.4	履带式车辆的牵引力	80
6.5	履刺的侧壁效应和间隔式履带	85
6.6	履带接地压力分布对牵引力的影响	88
6.7	最佳滑转率和最大牵引力	92
7	轮式行走机构与地面相互作用理论	95
7.1	轮胎的变形特性	95
7.2	轮式车辆的外部行驶阻力	97
7.3	轮式车辆的牵引力	104
7.4	地面力学研究的一些结论	109
8	车辆的通过性和地面的可行驶性	111
8.1	车辆的通过性	111
8.2	地面的可行驶性	113
8.3	车辆通过性的圆锥指数判断法	114
9	车辆行走机构的改进	116
9.1	车辆形态参数的相互关系	116
9.2	车辆按结构分类	119
9.3	铰接式车辆和列车	121
9.4	变形车轮和步行机构	124
9.5	特种行走机构	127
10	作业介质的物理机械性质	132
10.1	沥青混凝土	132
10.2	水泥混凝土	137
10.3	稳定土	142
11	摊铺机与作业介质相互作用理论	145
11.1	沥青路面摊铺机熨平板与混合料相互作用机理	145
11.2	浮动熨平板的运动学和动力学模型	153
11.3	沥青摊铺机双振捣梁——熨平板机构动态特性分析	162
11.4	碾压混凝土路面熨平摊铺机理研究	166
11.5	水泥混凝土路面摊铺机理	172
12	压实机械与作业介质相互作用理论	177
12.1	振动压路机与作业介质的相互作用	177
12.2	振荡压路机与作业介质的相互作用	189
12.3	振动平板夯与作业介质相互作用	196

12.4	压路机作用下土体的应力分析及压实效果比较	202
12.5	特殊压实机械	206
13	旋转式工作装置与作业介质相互作用理论	209
13.1	稳定土拌和机与作业介质相互作用理论	209
13.2	沥青路面铣刨机与作业介质相互作用理论	216
13.3	摊铺机螺旋布料器与作业介质相互作用理论	222
14	冲击式工作装置与作业介质相互作用理论	235
14.1	打桩机与作业介质相互作用理论	235
14.2	冲击式压路机与作业介质相互作用理论	248
15	平移式工作装置与作业介质相互作用理论	253
15.1	土的切削理论	253
15.2	挖掘机与作业介质相互作用理论	258
15.3	装载机与作业介质相互作用理论	261
15.4	推土机与作业介质相互作用理论	263
15.5	推土机的推土阻力测量方法	267
	参考文献	271

1 绪 论

1.1 地面力学的研究范围

地面力学(Terramechanics)是工程力学的一个分支,这门学科主要研究机器与其工作地面(土壤)之间的相互作用过程,所以又叫土壤—机器系统力学。所谓机器包括工程机械、农业机械、履带式车辆和轮式车辆等;所谓地面包括松软表层土和硬路面。本书主要研究工程机械(包括工作装置)和地面的相互作用,故称之为工程机械地面力学与作业理论。

研究地面力学的主要任务在于用理论分析和试验的方法揭示车辆在不同外界环境下的真实工作特性,预测车辆的牵引性能、滚动阻力及地面的承载能力,并且研究土的切削加工阻力,以达到改进车辆的牵引性能,进行车辆参数和土体条件的合理匹配,充分发挥车辆的工作能力这一目的。此外,根据不同土的物理机械特性、轮胎和履带的力学特性以及车辆负荷和车辆总体参数之间所存在的相互关系,建立一系列理论公式、纯经验或半经验公式,来进行车辆的优化设计和创造理想的行驶车辆。

地面力学研究的主要内容如下:

(1)车辆和地面的相互作用——预测车辆的牵引性能和行驶阻力,为合理设计、选择和运用车辆提供理论基础。

(2)车辆的通过性和越障能力以及土的承载能力。

(3)工作装置和土的相互作用——研究土的切削阻力以及土体切削机具的结构形式,以减少作业阻力和功率消耗,提高作业效率。

(4)车辆的振动问题——车辆的平顺性。

(5)车辆的两栖性能——车辆在水陆之间过渡地段上的性能。

1.2 研究地面力学的意义

众所周知,工程机械只有和地面相互作用,才能完成其功能。车辆在地面上行驶要靠土体来支承,要借助土的反力来发挥推进力,还要用推进力来牵引作业机具进行地面作业,况且大多数工程机械的作业对象就是土,所以工程机械和地面是一个自然的统一体。但是,多年以来,人们往往把这个统一体分开,孤立地偏重研究车辆本身,即研究发动机理论、材料力学、制造工艺、车辆结构及工作装置的改进等,而很少涉及车辆与地面之间的相互作用问题。对于机器的行驶阻力、牵引性能、通过性以及工作阻力等,都只利用一些安全系数较大的参数来评价。然而,由于对机器性能要求的日益提高,许多在已有安全系数掩盖下的未知因素的作用逐渐突出,迫使人们去深入研究车辆和地面之间的相互作用过程,于是,地面力学这个工程力学领域中的新分支就应运而生了。可想而知,研究地面力学对于改进车辆及工作装置设计所起的作用,和空气动力学对改进飞机设计以及流体动力学对改进船舶设计所起的作用是同等重要的。

研究地面力学无论对工农业还是国防事业的发展都有着极其重要的现实意义。由于车辆不易通过地形复杂、土体形状多变的地区而大大限制了该地区国民经济的发展;由于战车难以逾越沼泽、海滩或沙漠地带而贻误了宝贵战机;拖拉机胜任不了水田作业而无法使水稻生产根本摆脱繁重体力劳动的落后局面等,广泛而严重存在着的事实,已日益引起人们的关注。而地面力学研究的每一项成果,都将直接或间接地在这些方面给人类带来好处。

在军事上,车辆和机械的通过性能与越野性能,更是非常重要的问题。第二次世界大战期间,由于一些国家的战车不适应某些作战地区的土质条件,行驶困难,迟滞了战斗行动或贻误了战机,结果造成重大伤亡,甚至使整个作战计划遭到破坏。这种情况已引起许多国家的重视,它使人们又一次理解到车辆越野性能与土质有密切的关系,设计车辆的行走装置必须结合土的特性才能达到预期的效果。

地面力学的研究成果和提高机器工作效率、降低生产成本有密切关系。从农业方面来说,据统计,为了生产粮食,美国农民使用各种农机具,每年加工处理土壤达 2 500 亿 t,消耗能量相当大,如果通过地面力学的研究,提高效率 10%,则在能源节约方面就可以收到很大的效果。从工业方面来说,由于工程机械的作业范围是土方、石方和散粒物料的推挖、铲装、运输及平整等,范围很广,所以在国内外,它们被广泛地应用在民用建筑、水利建设、道路构筑、机场修建、码头建造、农田改良及国防工程中。随着科学技术的发展,人类为改善生活条件、提高物质生活水平而改造自然,重新安排山河的工程越来越大,如大运河的开凿,大水坝的构筑,大电站的建设及填海造田等,完成这些工程巨大的土方量需要消耗惊人的能量。如果通过地面力学的研究,达到减少车辆的行驶阻力、减少工作装置的切削阻力、解决车辆参数与土体性质的合理匹配、提高车辆的动力性和经济性等目的。那么,其效益将是相当可观的。

1.3 地面力学的发展概况

地面力学这门学科的萌芽虽然可以追溯到一百多年以前,然而它真正受到人们重视,被深入地进行研究,并将研究成果逐步付诸实际运用仅是近四五十年以来的事情。因此,严格地说,地面力学尚属一门年轻的科学。

人类最早的重大成就之一是轮子的发明。在开始使用轮子时,还并没有道路这个有利条件,只是在后来才认识到越野行驶问题是土—轮子的相互作用问题。关于车轮在变形土体上滚动过程的研究,早在 18 世纪末 19 世纪初就开始了。1875 年,胡斯塔(Wust)提出了车轮设计的简化方法,他建议:

$$W_n = K \sqrt{Db} \quad (1-1)$$

式中: W_n ——车轮载荷;

D ——车轮直径;

b ——轮缘宽度;

K ——土的变形模数, $K = \frac{2}{3}k \sqrt{Z_0^3}$;

Z_0 ——轮辙深度;

k ——常数。

胡斯塔公式直到今天在农业机械制造业中仍得到应用。

到 19 世纪中期,由于铁路建设的迅速发展,对降低马车行驶阻力的研究兴趣减小了。直到 20 世纪初,由于拖拉机的出现以及运输车辆本身质量的大大增加,人们对车辆在软土上的行驶阻力重新给予了必要的注意。1913 年,德国学者伯恩斯坦(R. Bernstein)研究了从动车轮的下陷问题,并在此基础上发表了以一个受均匀载荷的平板压入土体的方法来描述土的承载能力的论文,提出了土在压力的作用下,单位面积压力 p 和下陷量 z 之间的关系式:

$$p = Kz^{\frac{1}{2}} \quad (1-2)$$

式中: K ——土的变形模数。

20 世纪 30 年代,前苏联学者列托石涅夫等根据对农业机械理论的研究结果,提出采用通式来描述上述关系,即:

$$p = Kz^n \quad (1-3)$$

式中: n ——土的变形指数。

由于 K 值对一种特定的土不是常数,而且与载荷面积及形状有关,因此这样的公式无法普遍使用。伯恩斯坦和列托石涅夫等都曾试图对这个问题用一个经验常数来表示 K 值,但未获成功。

第二次世界大战后,由于军事越野运输和农业工程事业发展的需要,车辆—地面力学逐渐成为一门学科。关于车辆能发挥的最大推力问题,是由英国的密克莱威特(W. F. Micklethwaite)首先提出的,他在一篇关于土的力学和战车理论关系的论文中第一次提出:土对车辆单位接触面积的最大推力 τ ,可用土力学中的库仑(Coulomb)公式表示:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1-4)$$

式中: c ——单位面积的土的黏聚力;

σ ——垂直于剪切面积的单位压力;

φ ——土的内摩擦角。

他把土对车辆的水平反作用力分为推进力和滚动阻力两个独立部分来计算,用功能的方法来确定滚动阻力,这些方法至今仍被采用。应该说,他与伯恩斯坦共同建立了车辆—地面力学研究的起点。

1952 ~ 1954 年,该方面著名学者贝克在约翰·霍布金朗大学(John Hopkins University)工作期间,对土体下陷和行驶阻力的塑性问题进行了专门研究。贝克提出了土体(下陷深度 z 较小而负荷支承面积或宽度 b 较大)的应力应变关系式:

$$p = \left(\frac{K_c}{b} + K_\varphi \right) z \quad (1-5)$$

式中: K_c 、 K_φ ——由土的黏性和摩擦性所决定的变形模量。

不过,考虑到越野车辆在软土上行驶时下陷深度较大,故上式不能直接利用。贝克认为,适合于越野车辆的方程式应是把列托石涅夫和土木工程方面的公式合并起来,如:

$$p = \left(\frac{K_c}{b} + K_\varphi \right) z^n \quad (1-6)$$

贝克的试验证明: n 、 K_c 和 K_φ 实际上和负荷面积的尺寸及形状无关,故上式可用作解决土体下陷和运动阻力问题的基础。

1954 ~ 1960 年,贝克用试验方法测定土体下陷的 c 、 φ 、 K_c 、 K_φ 和 n 等各参数值,并致力于在车辆—地面力学的基础上,进一步发展车辆地面关系数学模型的研究,所有这些研究成果都

综合在 1960 年出版的《越野行驶》(Off-Road Locomotion)一书内。

从以上的叙述可见,车辆—地面力学的发展历史,是和贝克卓有成效的研究工作紧密联系的,由于贝克的杰出贡献,使得美国在车辆—地面力学的研究方面处于领先地位。

随后,陆地行驶实验室的贾诺西(Z. Janosi)等人,又进一步研究了贝克的土体剪切应力应变关系式,提出了拟合“渐近线型”土剪切应力应变关系式:

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) \left[1 - \exp \left(-\frac{j}{K} \right) \right] \quad (1-7)$$

式中:K——土的水平剪切变形模量;

j——土的水平剪切变形。

英国学者利斯(Reece)等人,于 20 世纪 50 年代后期起一直从事地面力学的研究,并对贝克理论中的承压特性公式提出了修正公式:

$$p = \left(CK'_c + \gamma \frac{b}{2} K'_\varphi \right) \left(\frac{z}{b} \right)^n \quad (1-8)$$

1964 年以后,利斯与 J. Y. Wong(黄祖永)合作,对车轮作用下土的流动和破坏现象进行试验观测研究,并于 1967 年发表了车轮作用下土体破坏两种流动区的研究结论。另外,英国剑桥大学土力学研究小组,遵循连续介质力学的理论,提出了饱和土的临界状态理论,开辟了地面力学理论研究的一个新渠道。

在日本,田中孝等人对拖拉机在水田地区的通过性问题,运用圆锥指数法的观点进行了大量的研究工作,并建立了一系列相应的经验公式。

前苏联学者柯西金和库兹可夫提出用两个参数表达土体承压特性,采用双曲正切函数拟合关系式:

$$p = p_0 \tan \frac{K}{p_0} z \quad (1-9)$$

式中: p_0 ——土的极限承载能力;

K——土的体积压缩系数。

早在 20 世纪 50 年代初期,我国科学工作者就认识到把土壤和机器作为一个系统来研究的必要性,并开始筹建室内外试验土槽。农业系统的院校和科研单位,对土壤—车辆力学和土壤—耕作力学也做了多种试验和研究,并取得了可喜的成绩。

1982 年,在陈秉聪教授等的倡导下,于无锡召开了“中国地面—机器系统研究会成立大会暨第一届学术会议”,从而使我国地面力学的研究活动得到了更好的开展。1984 年于武汉,1985 年于天津,1987 年于南京,1988 年于长春,1990 年于西安,先后召开了“全国地面—机器系统研究会”各届学术会议。

国内不少单位,如中国农业大学、吉林工业大学、长安大学、江苏理工大学、华南农业大学等,一直在深入开展地面力学的研究工作,并且取得了丰硕的成果,这些单位具有国内先进的实验仪器和设备,其中,长安大学工程机械实验中心拥有国内最大的室内实验土槽,可进行各种工程机械的原型试验。中国地面—机器系统学会成功地举办了第三届亚太地区地面—车辆系统力学会议,并于 1996 年 10 月,在北京举办了第十二届国际地面—车辆系统力学学术会议,进一步增进了国内外同行专家、学者的联系和学术交流,提高了我国地面—机器系统学科在国际上的学术地位。

1.4 地面力学的研究方法

研究车辆—地面力学的最终目的,是要建立反映车辆特性与地面性质之间的数学模型。由于地面力学的研究对象比较复杂,为此,许多学者采取了不同的方法,致力于车辆—地面系统数学模型的建立,要想详细地区分这些方法是困难的,但大体上可以分为以下几种。

1.4.1 纯经验方法

这种方法是先用观察和测量手段来鉴定土的特性,再将车辆在各种土体上进行试验,然后根据两组试验结果,找出土的特性和车辆性能之间的关系。像美国的 WES 圆锥指数法,就是一个典型的例子。它是用圆锥仪先测出某种土的圆锥指数,然后在同种土体上用车辆进行试验,在连续通过 50 次后的车辙内再测出所需要的最小圆锥指数,两者进行比较,就可以判断出此车辆在该种土体上的通过性能。由于 WES 法简单、快速、直观可靠,各国目前仍在采用。如日本学者田中孝等,就是用此方法研究水稻田的可行驶性问题。

1.4.2 半经验法

此方法是对车轮在软土上的作用进行力学分析,确定和测量适当的土的性质参数,并推导出包括车辆和土体参数的简化方程式。其研究特点与纯理论研究有所不同,不是把所有现象都用基本土力学来说明,而是比较近似地,甚至带有经验性地探求土和行走装置的相互作用关系,为设计和发展新型越野车辆提供依据和途径,因此称为半经验法。一般熟知的贝克方法即半经验法,此方法用车轮的挂钩牵引力 F 与其重量 W 之比来评价车辆的牵引附着性能,而挂钩牵引力 F 又等于最大牵引力 F_{Hmax} 减去外部行驶阻力 F_c ,所以:

$$\frac{F}{W} = \frac{F_{Hmax} - F_c}{W} \quad (1-10)$$

式中: F_c ——土的垂直变形所引起的阻力。

贝克对刚性车轮提出如下的简化公式:

$$\frac{F}{W} = \tan\varphi - \left[\frac{3}{3-n} \right]^{\frac{2n+2}{2n+1}} \times \left[\frac{W}{(n+1)(K_c + bK_\phi)} \right]^{\frac{1}{2n+1}} \times \left[\frac{1}{D} \right]^{\frac{n+1}{2n+1}} \quad (1-11)$$

式中: D ——车轮直径。

在导出上式时,贝克假设土的接触面积较小,而忽略了由于 c 值所产生的黏聚力部分。半经验法目前应用最广,例如,前苏联的阿葛伊金用理论和试验方法确定弹性轮胎在软土上的接触面积,日本的富一木多用假想的半径较大的刚性轮代替弹性轮胎来计算弹性轮胎的滚动阻力和挂钩牵引力等。

1.4.3 基本理论研究方法

此方法是用最新的塑性理论或有限单元法等来研究土体与车轮的相互作用。例如,美国的克拉费阿斯用塑性理论研究车轮下的应力分布;加拿大的扬格(R. N. Yong)和米兰提出“观察塑性法”,即假设:若车轮下土体颗粒的速度场已知(速度场是目测的),就可计算土的应力,

然后算出土的应变和应变率,再根据塑性理论中联系应变率和应力的基本方程,便可算出车轮下土的应力分布。近来,贝姆拉尔(J. V. Perumprat)、扬格等先后发表了几篇关于有限单元法用于研究车轮与土体间相互关系的论文。

英国剑桥大学的土力学小组,应用连续介质力学的理论来分析土的强度及应力—应变关系,提出关于“饱和黏土的临界状态理论”。由于该理论是从工程土力学范畴提出的,理论验证尚限于饱和黏土土样的三轴剪切试验,所以对车辆工程所涉及的表面土和工作情况,应用这一理论的条件、范围和可靠程度还有待进一步研究。

另外,美国、日本和我国一些学者,把土体作为流变体分析,着手建立土体流变学的理论工作也正在进行中,但有关这方面的研究,目前才开始,预计基本理论研究方法今后必将得到进一步的发展。

1.4.4 模型试验和因次分析方法

考虑到土的性状复杂,在土壤与行走装置的相互关系上,用理论分析的方法不一定能得到满意的解答,因而希望通过简便模型的试验来预测原型性能,为设计取得具体的参数。用模型试验的方法来解决车辆与土的关系问题及车辆设计问题,比一般的样车原型试验要迅速和经济得多。因此,某些国家早在 20 世纪 30 年代初就已经采用了模型试验的方法。

模型试验就是把自然物理现象中一切与车辆工作过程有关的因素按一定的比例缩小,并将该现象搬到实验室的土中来观察和试验,然后再把观察和试验得到的结果用一定的比例放大,从而得到发生于原型中的物理现象。

模型试验法可以很好地控制所有的试验参数,尤其是试验条件,对于一些简单基本的概念可以很快、很经济地进行推断。某些干扰因素也易于消除或至少减轻其干扰程度。有时用模型试验方法不能解决微观局部现象,那就要用实物原型试验。

美国水道试验站的迪爱尔(Deere)公司,曾用因次分析和模型试验的方法建立了轮胎和车辆的性能预测系统。目前,土壤—车辆力学研究中采用比较普遍的是以相似原理为基础,以量纲分析法作为相似条件的模型试验方法。1966 年,美国农业工程学会开展了相似原理的学术讨论,1970~1975 年相继进行过相似原理在土壤—机器系统中应用的讨论,推动了这方面的研究应用。如美国某公司在铲运机有关部件作用下土体流动状态的研究中,应用模型试验方法在定性分析上取得了可喜成果。

模型试验要求模型系统所有的参数相对于原型系统有各自对应的比例。这就要求不仅在几何方面,而且在动力学方面达到相似。但对于很复杂的土体性状来说,尚未研究出确切而适用的真正起主要作用的土体参数,就是得出了这样的参数,土体也难以控制,因此,不能满足完全相似模型的要求而产生畸变。近年来已有人开始采用畸变模型理论进行研究,以期在不能满足某些相似要求而产生畸变的情况下进行模型试验。虽然模型试验目前已在其他工程领域广泛采用,但在土壤—车辆力学中用模型试验预测原型的性能还不够充分,有待于研究发展以达到准确预测的目的。

1.4.5 电子计算机模拟方法

对越野性能进行电子计算机模拟是研究车辆—地面力学的最新方法。

最近,美军在某些寒冷地区进行了研究并在设计实验室以及水道实验站进行了试验,共花了大约 5 年的时间,进行了用电子计算机模拟车辆机动性的研究。其第一阶段的研究成果是

建立了“AMC-71 地面机动性模型”,此模型考虑了汽车在地面上行驶时可能碰到的一切主要影响因素,在模拟计算时作为电子计算机输入的有:用来描述地面每一点的 23 个变数,描述车辆的 76 个变数,描述驾驶员的 4 个变数。对这些变数可单独或综合考虑其影响。电子计算机的输出数据为给定地面条件下的实际最大车速或限制车速。如把影响变数的组合因素看成一个独立的参数,就可绘制出车辆沿特定路线可能行驶的速度分布图。

上述模拟方法的研究目前正在继续进行中,研究的最终目的是试图建立一个用简单数学式表示的预测系统,并且此数学式应适合于计算机的执行程序。

2 土的物理机械性质

由于土的性质决定着车辆的行驶性能,所以不了解土的性能以及它与轮胎或履带的相互作用,就不可能了解车辆行驶的主要规律,为了研制新型车辆使之适应于某种特定的自然条件,就必须首先确定和计算出与车辆行驶有关的土的参数值,同时,土也是铲土运输机械(或称土方机械)的工作对象。土方机械在作业过程中,工作部件(如推土板、铲斗等)的切削刃要对土体进行切削,在切削过程中,机器为了克服土的切削阻力而消耗的能量,在大多数情况下,又是通过地表土层对机器的反作用而发挥出来的。因此,机器在工作过程中,土的切削阻力、地表土层对机器的支承能力和对机器的行驶阻力以及对机器的水平推进力,是影响机器性能及效率的重要因素。由此可见,要进行系统的工程机械—地面力学研究,务必先了解土的物理机械特性。

2.1 土的形成与结构

2.1.1 土的形成

土是经岩石风化作用(包括物理风化、化学风化及生物风化)后,以不同的搬运方式,在不同的地点堆积下来的自然历史产物。风化、搬运和堆积这三者不是简单的互相衔接,而是在搬运和堆积过程中风化仍然在继续,并且它也并不是只经过一次的搬运和堆积,而往往是经过多次的搬运和堆积的。由于风化、剥蚀、搬运、沉积等成土过程各环节的交错反复,成土的自然地理环境的复杂多样性,土的类型与性质是千差万别的。但无论如何,凡在大致相同的地质年代及相似的沉积条件下形成的堆积物,往往在成分及性质上是相近的,这就为土的分类提供了依据。

岩石暴露在大气中,经受风、霜、雨、雪的侵蚀,动植物的破坏,地壳运动的压、挤,气温的变化,裂缝中积水成冰膨胀等作用,就逐渐由大块体崩解为较小的碎屑和颗粒,这一过程称为物理风化作用。岩石经物理风化形成的物质,基本上仍保持原来岩石(母岩)的成分,仅发生量的变化,随后,这些碎屑和颗粒由于受到某种动力地质作用(例如重力、水流、冰川或风力等),它们可以由甲地搬运到乙地堆积起来,在搬运和堆积期间又受大气中某些气体,例如碳酸气(CO_2)、氧气(O_2),或者植物的腐蚀等的化学及生物作用,使这些碎屑和颗粒分解为非常细小的颗粒状物质,这一过程称为化学及生物风化作用。这些经化学及生物风化作用的物质与原来的岩石(母岩)成分截然不同,使岩石产生质的变化。

实践经验表明,土的工程特性一方面固然取决于原始堆积条件,使其组成的结构构造、矿物成分、粒度成分、孔隙中水溶液的性质等不同;另一方面也取决于堆积以后的经历,如生成年代的长短、自然地理条件的变迁等,都可引起原始堆积物的成分或性质的某些改变。一般生成年代越长,上覆土层重量越大,土压得越密实,由孔隙中析出的化学胶结物也越多。因此,老土层比新土层的强度及变形模量要高,甚至由散粒体经过岩化作用又变成整体岩石,如砂土成为

砂岩,黏土变为页岩等。不同的自然地理环境对土的性质也有很大影响。我国沿海地区的软土、严寒地区的永冻土、西北地区的湿陷性黄土、西南亚热带的红黏土等,除了具有一般土的共性外,还具有自己的特点。

在地面力学研究中,所谓“土”或“土壤”,由岩石的物理风化和化学风化所产生的固体颗粒,以及颗粒之间的水和空气等三部分组成。风化后的固体颗粒仍留在原来位置者称为残积土;由于各种原因而搬动者(如雨水的冲刷、淤积)称为运积土。农业上的“土壤”是指生长了有机物并含有较显著的腐殖质的土体表层。本书中,“土”与“土壤”两词没有本质的区别,并且在一般情况下,亦不考虑其中是否含有机物。与“土壤”一词相对应,“岩石”是指由极大强度和永久性内聚力结合的矿物自然团。在本书中,“岩石”与“土壤”的界限也是不很严格。

2.1.2 土的结构

自然界中的土,是以颗粒或颗粒的集合体形式存在的。土粒或土粒集合体的大小、形状、相互排列与联结等综合特征,称为土的结构。土的结构可分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构,如图 2-1 所示。

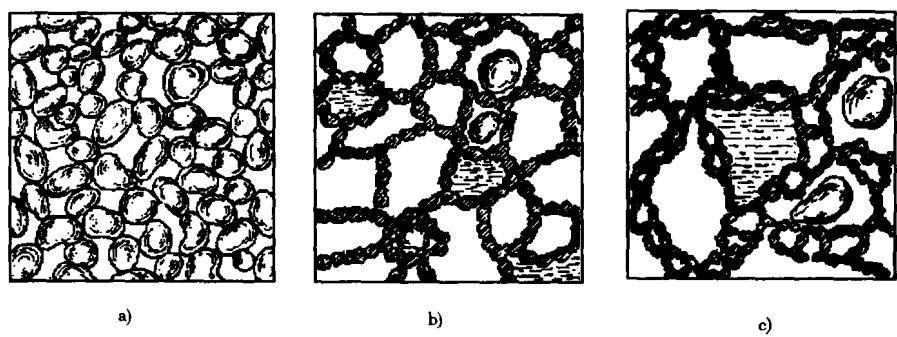


图 2-1 土的结构类型
a)单粒结构;b)蜂窝结构;c)絮状结构

1)单粒结构

单粒结构(图 2-1a)为砂土和碎石的特征,是由土粒在水或空气中,在其自身重力作用下沉落堆积而成。由于土粒尺寸较大,颗粒间分子引力远小于土粒自重,故土粒间几乎没有相互联结作用,是典型的散粒状物体。疏松的单粒结构中,颗粒间孔隙大,颗粒位置不稳定,不论在静载或动载作用下都很容易错位,尤其在振动作用下,体积可减少 20%。紧密的单粒结构中,颗粒的排列已接近最稳定的位置,在静载或动载作用下体积均不发生较大的变化。

2)蜂窝结构

蜂窝结构(图 2-1b)多为颗粒细小的黏土所具有的结构形式。粒径在 0.002 ~ 0.02mm 的土粒在水中沉积,下沉途中碰上已沉积的土粒时,由于土粒间分子引力对自身重力而言已足够大,便停留在最初接触点上不再下降,形成孔隙很大的蜂窝状结构。蜂窝状结构的孔隙一般远大于土粒本身的尺寸。

3)絮状结构

絮状结构(图 2-1c)是颗粒最细小的黏土所具有的结构形式。粒径小于 0.002mm 的土粒能够在水中长期漂浮,不因自身重力而下沉,当水中加入某些电解质后,颗粒间的排斥力削弱,运动着的土粒凝聚成絮状物下沉,形成类似蜂窝状但孔隙却很大的结构,称为絮状结构。