



潮湿地区细粒土 工程特性与填筑控制技术

CHAOSHI DIQU XILITU

GONGCHENG TEXING YU TIANZHU KONGZHI JISHU

谈云志 万智 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

潮湿地区细粒土 工程特性与填筑控制技术

谈云志 万智 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书较为全面地研究了潮湿地区细粒土的工程特性,并针对路基填筑应用过程中存在的问题提出了填筑控制参考标准或建议,强调工程实用性。全书共有7章,包括绪论、细粒土压实曲线及压实特性方程、典型细粒土的抗压(剪)强度与持水特性、典型细粒土击实与承载比强度的水稳定性、凸块碾振动碾压机理简化分析、典型细粒土的现场压实试验、潮湿地区公路细粒土的分类与填筑控制技术。除绪论外,各章都详细介绍了试验细节、试验结果和结论,并对工程建设的指导意义均有说明。

本书可作为高等学校土木工程专业及其他相关专业的教学参考用书。此外,还可供土木工程设计、施工、科研、管理和监理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

潮湿地区细粒土工程特性与填筑控制技术 / 谈云志, 万智著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014.5
ISBN 978-7-5170-2082-0

I. ①潮… II. ①谈… ②万… III. ①潮湿—气候条件—影响—道路工程—工程施工—研究 IV. ①U415

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第109686号

书 名	潮湿地区细粒土工程特性与填筑控制技术
作 者	谈云志 万智 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.5印张 312千字
版 次	2014年5月第1版 2014年5月第1次印刷
印 数	0001—1800册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

作者介绍



谈云志，男，1979年9月生，湖北阳新人，博士，副教授，三峡大学“151人才”学术带头人，三峡大学首届“拔尖人才培养计划”入选者。主要从事特殊土土力学方面的学习与科研工作。硕士阶段（2003—2006年），以《固结压力作用下的持水特征曲线研究》为题开展研究工作；博士阶段（2006—2009年），以《压实红黏土的工程特征与湿热耦合效应研究》为题，从事特殊土方面的研究工作。先后主持的科研项目有：国家自然科学基金项目“荷载与增减湿循环共同作用下压实红黏土的变形特性”（51009084）、岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目“增减湿循环下易崩解泥岩的力学性能演化规律研究”（Z011002）等3项。参与的项目有：西部交通科技建设项目“红黏土地区公路修筑关键技术研究”（200631878530）等。在《土木工程学报》《岩土工程学报》和《岩土力学》等权威期刊发表相关学术论文40余篇、已申请和授权的发明与实用新型专利6项。



万智，男，1976年2月生，湖南安乡人，博士，副研究员。主要从事公路路基填土工程特性与公路软土地基处理、公路边坡加固与防护技术研究。先后参与和承担了国家自然科学基金、交通部西部交通建设科技项目、湖南省交通科技项目等20多项重大技术攻关课题的研究工作，取得了多项具有国际先进水平的科研成果，创造性地解决了湖南省交通建设中的特殊土路基填筑、公路路基边坡及滑坡处理、公路软土路基处理、公路岩溶地基处理等诸多重大公路路基修筑技术难题，形成了湖南特殊土路基处治的成套技术，撰写了逾60万字的课题研究报告9套，先后在《岩土力学》《湖南大学学报》等国内刊物上发表了高水平论文30余篇，荣获湖南省科技进步奖三项、中国公路学会科学技术奖两项，研究成果被广泛应用于高速公路建设工程中，产生了显著的经济和社会效益。

前言



公路建设中,一般粉土和黏性土、红黏土和膨胀土等细粒土填料较为常见,普遍存在天然含水量较高、难以压实的不良工程特性。直接利用上述填料进行路基填筑时,常难以同时满足现行规范对填料的强度与压实度所作的要求,且路基的长期稳定性能也难以得到保证。以往公路建设中,对这类高含水量细粒土一般采用改良或废弃换填的方法处理。添加石灰、水泥等固化剂进行改良不仅施工上难以拌和均匀,也将大幅增加工程成本。废弃换填则需要新征弃土场与取土场,占用大量宝贵的土地资源,在当前环保要求不断加强和用地日趋紧张的背景下,废弃换填的简单办法既不科学又不经济。因此,充分利用这类土填筑路基是发展的必然趋势。

随着水利、交通工程的快速发展,国内对膨胀土和红黏土的研究比较多,如《岩土工程学报》《岩土力学》和《水利学报》等杂志均有大量的报道,但期刊论文大多以机理研究为主,工程应用方面偏弱。本书较为系统地总结了湖南省公路建设中遇到的几类典型细粒土的工程特性和部分应用实例,希望本书的出版能为潮湿多雨地区细粒土的工程应用提供一些有益的参考。

本书是谈云志博士和万智博士多个科研项目的总结,参与该项目的还有湖南省交通科学研究院万剑平研究员、中国科学院武汉岩土力学研究所孔令伟研究员和郭爱国研究员等。第1章、第2章和第5章由万智撰写,第3章、第4章、第6章和第7章由谈云志撰写,任毅参与了第6章部分内容的整理;研究生董波、刘云和陈可参与了书稿的编排和校对工作。同时,书中还引用了国内外有关细粒土的一些工程实例和试验方法,在此一并向他们表示感谢。

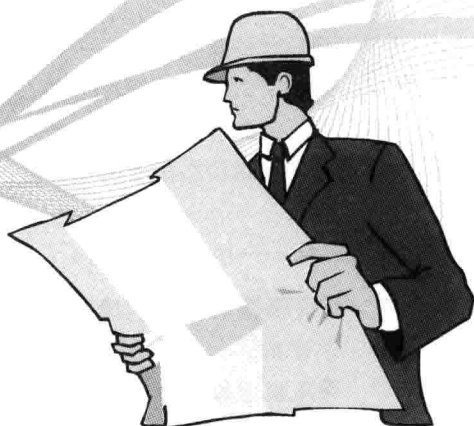
本书能如期出版,得到了三峡大学土木与建筑学院和三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心的全额资助,感谢学校和学院领导的支持和信任。

由于水平有限,虽历经反复阅读和修改,书中难免有纰漏和表述不当之处,恳请读者和同行提出建设性的意见。

作者

2014年2月

目 录



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状分析	3
参考文献	10
第 2 章 细粒土压实曲线及压实特性方程	14
2.1 标准击实试验	14
2.2 细粒土压实特性及工程性质	15
2.3 全压实曲线方程的建立及曲线特征	18
2.4 方程参数对全压实曲线影响	24
2.5 细粒土全压实曲线参数的物理意义	27
2.6 应用实例	32
2.7 小结	35
参考文献	35
第 3 章 典型细粒土的抗压（剪）强度与持水特性	37
3.1 无侧限抗压强度	37
3.2 抗剪强度	46
3.3 不同湿化状态下红黏土的压缩特性	54
3.4 持水特性	60
3.5 改良粉土强度的冻融循环效应	74
3.6 小结	82
参考文献	82
第 4 章 典型细粒土击实与承载比强度的水稳定性	86
4.1 细粒土的基本物性	86

4.2	细粒土的击实特性	87
4.3	细粒土的承载比强度特征	90
4.4	膨胀特性与制样含水量关系	100
4.5	制样初始状态与 CBR 的关系	103
4.6	小结	107
	参考文献	108
第 5 章	凸块碾振动碾压机理简化分析	109
5.1	理论基础	110
5.2	碾压机理静态简化分析	112
5.3	碾压机理动态非线性分析	120
5.4	小结	130
	参考文献	130
第 6 章	典型细粒土的现场压实试验	134
6.1	影响路基现场压实因素分析	134
6.2	潮湿含砂粉土路基的碾压	139
6.3	红黏土路基的现场压实试验	151
6.4	粉土路基的现场压实试验	160
6.5	高液限土现场碾压试验	166
6.6	小结	168
	参考文献	168
第 7 章	潮湿地区公路细粒土的分类与填筑控制技术	170
7.1	细粒土的分类	170
7.2	路基压实控制指标与标准现状分析	178
7.3	潮湿地区细粒土填料的压实控制指标	186
7.4	小结	202
	参考文献	202
附录 A	试验示范路剪影	203
附录 B	英文缩写词	207

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的和意义

交通运输已经成为国民经济快速增长的基础之一,随着我国全面建设小康社会的历史进程不断推进,公路工程建设规模不断加大,公路等级不断提高。总结与探索公路施工中的技术难题,对加快公路建设步伐、提高工程质量、节约工程成本具有十分重要的意义。

公路细粒土路基填料是指颗粒组成中小于 0.075mm 颗粒所占的质量大于总质量 50% 的土。在我国中南、西南地区的公路建设中,含砂粉土、一般粉土和黏性土、高液限红黏土和膨胀土等细粒土填料较为常见。这些填料工程特性差异较大,天然含水量较高、施工碾压困难是工程建设中存在的一个普遍问题。直接利用上述填料进行路基填筑时,常难以同时满足现行规范对填料的强度与压实度所作的要求,且路基的长期稳定性能难以保证。改良或废弃换填是以往公路建设中对这类高含水量细粒土的常用处治方法。对潮湿的细粒土掺加石灰、水泥等粉体材料固化剂进行改良处理的室内试验效果良好,但由于黏性细粒土填料本身的过湿结团特性,现场要达到均匀拌和非常困难,容易导致路基出现不均匀沉降等工程病害;另外,掺加固化剂以及进行拌和施工也将大幅增加工程成本。因此,应尽量避免采用掺灰等改良措施。废弃换填的方式则需要新征弃土场与取土场,占用大量宝贵的土地资源,在环保要求不断加强和用地日趋紧张的状况下,废弃换填的简单办法看来既不科学又不经济,充分利用这类土填筑路基是发展的方向与必然趋势。

现代公路交通中,大吨位汽车所占比例越来越大,且从理念上将建设工程的安全性和耐久性放到了首要的位置上,同时对路基的压实度标准和修筑质量也提出了更高的要求。由于影响路基填料压实的因素十分复杂,加上土本身的不均匀性和各向异性等特点,以及在投入使用过程中受环境气候、重复交通荷载等影响。因此,涉及路基压实而需要深入研究的问题很多。为保证其长期稳定性,需要对填料的工程特性和路基压实填筑控制技术进行深入研究。研究在施工过程中如何采用合理的碾压技术保证土体达到压实标准;研究合理的施工工艺、压实控制方法以及使用过程中保持其强度与稳定性的技术措施。对于路基压实方面仍有如下几个方面的内容值得深入研究。

(1) 进行室内击实试验的初衷是通过击实试验确定路堤现场填筑控制的密实度和含水量,实现对路堤现场压实的模拟和施工控制。对于土体击实,过去一直采用多项式来拟合压实曲线,确定其最大干密度和最优含水量。该方法可以方便快捷地确定击实试验中的最



大压实干密度与其对应的含水量,但其应用方面存在很大的局限性。首先,它不能和土体物性指标直接建立关系,也就不能确定压实曲线的形状、大小和位置,适当延伸压实曲线后便有可能出现干密度为负值(压实干侧)和土体饱和度超100%(压实湿侧)等与工程实际不符的情况。此外,拟合多项式仅仅能表示某种土体在一定的试验条件下与有限含水量范围内的变化情况。当现场压实机械所提供的压实功和压实方式与室内采用的击实试验方法相差较大时,就不能通过室内试验的结果来有效模拟现场压实施工的问题。同时,当击实土体的性质稍有改变时,也不能通过已有的压实曲线来预测新的压实曲线。

(2) 国内公路路基质量与国外发达国家相比存在一定差距,实际上国内现行重型压实标准比美国大多数州所采用的葡氏标准(相当于国内轻型击实标准)还要高。出现上述现象的原因主要是国内路基压实控制指标和标准体系方面的建设很不完善。第一,填土选择。尽管中美两国的分类依据大致相同,但美国对土的种类划分更详细、明确和简单实用,尤其是将高、中塑性无机黏土(高液限土、膨胀土)进行了更详细的分类,这在一定程度上扩展了适用于填筑路堤的填土范围。同时,美国标准对每类填土均明确了适宜的填筑部位,其中对易吸水膨胀的土体规定其必须填筑于路堤下部某一深度范围内,依靠上覆荷载抑制其膨胀,这更有利于保证路堤的体积稳定性。第二,填土含水量控制。美国标准与填土的分类、地区气候相对应,根据填土的性质确定其适宜的含水量,总体上美国的含水量控制标准更倾向于在最优含水量的湿侧压实土体,这更有利于保证路堤的体积稳定性,与不考虑土的性质而采用同一含水量控制范围的方法相比,该法更为合理。

(3) 压实方式方面。国外很多国家对于黏性土路基早就使用凸块碾进行碾压,这种压路机压实黏土时,其施工效率比普通光轮压路机提高三倍以上,且影响深度加大、土体层间结合好、质量均匀,是适合黏性细粒土路基压实的首选设备。然而,国内的黏性细粒土路基压实过程中,投资方大多对压实设备的类型没有作出明确的要求,施工单位更没有自觉地使用这种设备。诚然,使用其他类型的压路机在一定程度上也能将土体碾压到规范的要求,但相对费工费时,显然这与当前大力提倡落实科学发展观和建设资源节约型社会的要求相比存在不少差距。因此,有必要深入研究凸块式振动压路机的压实特性和细粒土填料的工程特性,深化对凸块式振动压路机的压实机理及其压实施工参数的优化研究,以提高细粒土填料的压实施工质量。

通过对细粒土路基填料压实特性的研究,重点分析填料颗粒组成、黏粒含量、压实含水量等土体物理力学指标和压实作用方式对压实特性的影响,通过建立反映土体物理性质和压实作用方式影响的压实曲线统一表达式,即通过对土体物理指标和少量的室内击实试验,来代替大量的重复击实试验;通过现场试验研究,分析压实过程中各种影响因素、总结典型填料在整个压实过程中的变化规律,提出典型细粒土路基压实施工工艺和方案,减少试验成本,提高压实施工效率;通过试验研究细粒土的压实特性,潮湿地区的膨胀土、偏粉砂土、高液限黏土的工程特性及压实控制标准;分析总结国内外的压实控制标准,提出适合我国南方潮湿多雨地区细粒土的压实控制标准。不仅指导了湖南省衡炎、衡邵、郴宁、娄新等高速公路典型路基填料的施工,产生了较大的经济效益和社会效益;而且也相关规范的修订和完善提供有价值的佐证材料和建议,对全国其他省区公路建设都具



有重要的指导意义。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 细粒土压实机理与压实特性

公路工程中,细粒土是指小于 $75\mu\text{m}$ 粒径的土体质量大于总质量的50%的土体,包括粉质土、黏质土。从土体性质归类,粉质土和黏质土均属具有一定黏性的土料,故工程上也统称为黏性土。

各种细粒土、天然砂砾土等经过压实后,在单位体积内通常包含固体颗粒、水和空气等三部分,通常称为三相体。此三相体中,水和单个颗粒是不可压缩的,空气也只有在密闭容器内才是可压缩的,但在土体内也是不可压缩的。因此,要使单位体积内的固体颗粒增加,只有采取措施使土体内的空气和水排出。用机械碾压就是施工现场所采取的主要措施。但是,对于黏性细粒土,用一般碾压机械的短时荷载或振动荷载是不能将水排出来的。因此,本质上,压实过程就是使土中的空气排出,提高密实度。碾压得越密实,单位体积内的固体颗粒越多,空气越少。在某一含水量时,土的理论最大密实度就是土中空气等于零,土为两相体。但 Seed 和 Lee 通过研究指出,由于土粒和水对空气的包裹作用,无论怎样压实,土体都始终无法达到完全饱和的状态,即通过压实完全消除土中的空气是不可能的。

Proctor (1933) 在《Engineering News record》杂志上发表了研究成果《土的压实基本原理》阐述了土的压实机理。Proctor 认为含水量对压实过程的影响主要是发挥其毛细作用和润滑作用。压实曲线在“最优含水量”处出现“转折”的原因与毛细作用和摩擦力有关。由于表面张力使土中束缚在土颗粒表面的水分子形成薄的水膜,当土颗粒之间的水膜相接触后,表面张力所形成的毛细压力使土颗粒紧紧地相互吸引到一起,形成粒间摩擦力,施加的压实功就是消耗于克服黏性土粒间的摩擦力。随着含水量从干侧持续增加到湿侧,水在粒间起润滑作用,减小了粒间摩擦,因此降低了土的抗剪强度。在压实过程中,颗粒彼此之间更易滑动,使压实干密度增加。当水分继续增加,直至水开始占据空气孔隙时,再增加压实能量并不会增加土体的密实度。Proctor 关于毛细作用形成土体抵抗压实作用的观点与后来的研究结果一致,不过他更加强调“润滑”的作用。

Hogentogler (1941) 提出了黏滞水理论 (Viscous Water Theory)。他认为颗粒表面第一层吸附水具有很高的黏滞性,随着吸附水离颗粒表面的距离增加黏滞性下降,吸附水逐渐成为自由水。土粒被黏滞水的接触表面分隔,当含水量较低时接触点间水的高黏滞性导致土体具有高抗剪强度,从而导致土体难以压实;随着含水量增加,吸附水层增厚黏滞性降低,使抗剪强度减小,干密度增大。但只有当含水量不超过某一阈值时,黏滞性减小。当含水量超过此阈值后,再增加含水量就产生“润滑”作用。他认为最大的润滑作用发生在“最优含水量”时,超过了最优含水量,土颗粒发生位移,使干密度降低。1955年以后的研究发现,大多数黏粒表面吸附水的厚度不大,约为几个分子厚,尽管关于吸附水黏滞性的数据多少有些矛盾,但没有一个超过了头几个分子层。大多数土体被压实所采



用的含水量似乎远远超过了吸附水的黏滞性起着重要作用的含水量。

Hausmann (1990) 对 Hogentogler 的黏滞水理论进行了概括。Hogentogle 认为在压实过程中, 水起润滑作用, 并把压实曲线分为四个阶段: ①随着水被土体吸附, 土变成含水物; ②水开始起到润滑作用, 有助于土颗粒重新排列, 土体开始越来越密实, 直至达到最优含水量; ③水持续增加, 土体因水过多产生膨胀; ④随水的增加, 土体接近饱和。但研究表明, 土体压实不可能达到完全饱和, 压实曲线的湿侧趋向于平行于饱和曲线 (Zero air void curve) 而不是与之相交。Winterkorn 和 Fang 认为, 基于有效应力原理的压实理论比基于润滑或黏滞水的理论能够更好地解释压实曲线的形状。实际上路基填土处于非饱和状态, 由固液气三相介质组成其压实性状与土的三相组分比例及传力机理有关。

Lambe 研究了压实对黏性土微观结构的影响, 提出了基于物理化学特性 (Physico-chemical properties) 的理论。他发现压实含水量低时 (最优含水量的干侧), 孔隙水中的电溶质浓度高, 围绕黏粒的分散性双电层 (Double layers) 得不到充分发展, 减小了土颗粒间的溶质排斥 (Osmotic repulsion) 作用, 土体产生絮凝结构 (Flocculated structure)。这种情况下土粒排列杂乱、干密度低、抗剪强度高、渗透性大; 随着压实含水量的增加, 围绕黏粒的双电层扩大, 增大了土粒的排斥作用, 絮凝度降低, 干密度增大; 随着压实含水量的继续增加 (最优含水量的湿侧), 电溶质浓度继续降低, 双电层得到更充分发展, 使颗粒间排斥作用更大, 土体产生分散结构 (Dispersed structure), 土颗粒因为水的润滑作用而更易移动, 排列更为定向, 渗透性较低, 抗剪强度下降。但因水的增加, 使单位体积土中的颗粒减少, 因此, 干密度又降低。尽管 Lambe 的理论并不能直接解释压实曲线的形状, 但有助于解释压实土的强度和体积特征。

Olson 认为, 上述三种解释含水量对黏性土压实曲线影响的理论, 即 Proctor 的“毛细作用与润滑”理论、Hogentogler 的“黏滞水理论”、Lambe 的“物理化学特性”理论, 都没有得到室内试验的检验。例如, 如果水的功能是起润滑剂作用, 那么用像四氯化碳 (Carbon tetrachloride) 那样的非润滑液体代替水, 就不会得到典型的压实曲线; 如果 Lambe 的双电层理论的应用是正确的, 那么用像苯 (benzene) 那样介电常数低的液体代替水, 也不会得到典型的压实曲线。

Olson 认为, 上述几个理论很大程度上都是推测的。因此, 他提出用有效应力原理来解释含水量对土体压实的影响。当黏性土的含水量小时, 在一定击实功作用下, 虽然此时土粒外围水膜较薄, 粒间黏结力较强, 可以抵消部分击实功的作用, 土团不易被打散。同时, 此时土的排列方向很不规则, 呈片架结构 (Cardhouse fabric), 所以干密度较小。但是, 在含水量增大到最优含水量之前, 总的来说, 土中气体与外界连通, 在击实能量的作用下, 气体被排除。随着含水量的增加, 薄膜水增厚, 粒间连接力减小, 对击实能量的作用越来越小, 加之土团之间水分的润滑作用使土易于变密, 即干密度随着含水量的增加而增大。当土的含水量接近最优含水量时, 土中仍有封闭气体, 击实时水、气都不易排除, 土中产生孔隙压力。根据土的有效应力原理, 此时土粒间的有效正应力减小, 因此土的抗剪强度降低, 即孔隙压力的产生抵消击实功的作用。这时含水量的变化对干密度的影响并不明显 (击实曲线的坡度平缓), 但此时土粒的水膜增厚, 粒间联结力减小, 使得土粒在



击实功作用下排列更加定向。当土的含水量超过最优含水量时,水分的增多会使击实干密度变小。且这时土中的空气基本上是封闭型的,土中孔隙水压力和孔隙气压力又对击实功起抵消作用,故击实效果不显著。由于此时水膜更厚,土粒更易被击实成为定向排列,呈片堆结构。

Lambe 等通过研究发现,大多数室内试验和现场压实曲线都具有某种相似关系,这有力证明了通过室内击实试验模拟现场压实的可行性。但长期以来对压实曲线研究的重点集中于找寻通过击实试验数据获得压实曲线的数值拟合方法,以确定土样的最大干密度和最优含水量来控制施工。较典型的如一点法、三点数值解法、切比雪夫原理拟合法、最小二乘原理拟合等多项式拟合。此外, Pandian 等人还曾采用两个分开的公式来分别表征压实曲线在最优含水量干侧的上升和湿侧的下降。由于这类压实拟合曲线的各参数不具有任何的物理意义,且以往的成果多集中于研究土体处于最优含水量及其附近区域土体工程性质和压实性能,对压实曲线的边界状态研究较少,一直未能通过以土体物理力学指标为纽带,建立起室内击实试验对现场压实施工的有效模拟。同时,由于这类压实拟合曲线的各参数不具有任何的物理意义,即使对特定土样也无法通过既有压实曲线来有效预测压实功改变后的击实曲线和土体的工程性质。Faure (1981) 和 Faure 和 Da Mate (1994) 对于细粒土在较大含水量范围内的压实情况进行了研究。研究结果表明,在土体含水量小于压实敏感阈值时,土体的最大干密度基本保持不变。Faure 和 Da Mate 对于混合了黏土和其他的细粒土以及粗粒土的 34 种混合土体以及来自巴西和法国的 36 种自然土体进行了全压实曲线研究。Johnson (1960) 对于新布鲁克林的重黏土和湖积土进行了相关研究, Li 和 Sego (1998) 对于来埃尔贝塔北部的湖积土进行了研究。结果显示,位于压实敏感阈值时的含水量与土体黏土含量成正比例关系,并且与土体的矿物学特征以及压实功存在一定关系。Li (2001) 在总结以往研究成果的基础上,通过系统研究细粒土填料的压实干密度及饱和度随含水量变化(含水量从零开始逐渐最大)的完整压实曲线,提出了土体压实曲线的四参数方程,且将这些方程参数与土体的部分物理力学性质指标建立起某种量化关系,首次对压实曲线赋予了全新的物理意义,并应用该曲线对压实土体的强度等工程性质进行了计算和预测,有力提升了压实曲线对压实施工的指导作用。虽然该研究起步不久,方程参数和土体的物理力学指标的量化关系还有待通过大量的试验和更为深入的研究予以修正,但这无疑提供了一种可以借鉴的研究新思路。

当细粒土在给定的压实功作用下其密度会随着含水量的变化而改变,这样就可以得到一条典型的密度与含水量关系曲线。压实曲线的形状与土体的颗粒分布和所采用的压实方法密切相关。细粒土的压实曲线的确立是建立具有可靠实用价值的现场控制标准的基础。

Woods 等人 (1938) 对 1383 个 Ohio 的土样结果进行分类和平均,得到了一个典型的压实曲线簇。平均曲线基本上都具有相同的形状。通过分析这些来自于特定的地理地区或者地质区域土样的压实试验结果,发现压实曲线具有某些特征可以用来表征一个系列的典型压实曲线类型。因为同一地区土体颗粒的变化符合相似的地质演变,所以存在曲线簇。当土体颗粒为粗砾时,在干密度和含水量坐标上,曲线向上发展并且一直向左发展,这种类型的曲线称为类型 A。



对于土体压实曲线簇的理解使得依靠单个的室内击实试验来预估土体的压实曲线成为可能,并且可以用于确定土体的最大感密度和最优含水量。作为美国国家公路与运输协会标准(AASHTO)的推荐试验方法,一点法已经在工程实践中使用很多年。同样他也被收录入美国测试与材料协会(ASTM)手册。

对于同样的土样,当采用不同的压实作用方式或者压实功时,许多室内和室外的试验结果都得到了具有相类似形状的压实曲线。当压实功增大时,曲线向坐标左上方向偏移。这样就得到了另外一种类型的压实曲线簇,称为B型。在路建设过程中,通常都采用不同种类的压实机械,但是其吨位以及压实遍数都会发生变化以得到不同的现场压实作用力。同时也发现,在压实过程中,如果松铺厚度不相同那么需要的压实作用力也是不同的。因此,如果可以得到压实曲线簇,那么就可以帮助设计者针对于某一给定现场项目选择压实层的铺筑厚度或者选择其所需要采用压实作用力。

尽管一般压实曲线都被认为是铃铛形曲线,但是对于采用什么方法来表征压实曲线却一直缺乏好的方法。同时很少有研究关注过到底是什么因素在控制着压实曲线的形状和位置。过去一直采用多项式拟合压实曲线,一般使用二次曲线、三次曲线甚至是四次曲线。尽管采用多项式拟合非常方便,但是因为它只是拟合曲线使得其应用受到了很大的限制。它不具备直接和土体物理性有关的参数,不能控制压实曲线的形状、大小和位置。一般来说,拟合曲线的参数变化范围相当巨大,甚至达到了3次方的数量级,并且有时会从正值变化到负值。因此很难在工程实践中取得合适的值。同时它还存在着另外一个缺点,其仅仅能表示某种确定土体在一定的试验条件下、在有限的含水量范围内的变化情况。预估的干密度有时甚至会成为负值,或者出现了压实曲线出现在了孔隙率小于0的区域。

1.2.2 压实土的工程性质与潮湿地区压实标准

工程中十分重视对压实填土在最优含水量及附近的工程性质研究。研究表明,在最优含水量干侧压实黏土形成定向排列差的絮凝结构,而在湿侧压实形成定向排列的分散结构,其后用电子显微镜检查发现主要差别表现在微观结构上,在干侧压实的土具有明显的双重结构,被孔隙包分开的团粒结构和团粒内的结构,而湿侧压实形成更均匀的结构。可见,不同含水量状态,土体结构不同,使其工程性质出现较大差异。即使对于处于同一含水量的土体,分别采用干法和湿法制作土样击实,杨世基(1991)也通过试验证明也会得到不同的试验结果,表明在实际上合理的压实含水量应根据填土的类型和要获得的工程性能以及实用性来选择。

除压实黏土的土体结构外,细粒土的颗粒级配组成和黏粒含量也对土体工程性质有重大影响。土的体积变化是土的最不利的工程性质之一,对于细粒土,除土的压缩外,其体积变化主要取决于膨胀潜势,而其膨胀变形又取决于黏粒与水的相互作用,在较低含水量情况下,土体压实后的干密度较大,若单位体积内黏土颗粒含量越多,遇水后土的膨胀变形就越大。印度学者用ASTM滤纸法在碾压黏土中测试基质吸力时发现,黏粒含量越大,土中基质吸力越大,浸湿越容易塌陷,根据实验结果建议在压实黏性填土时,控制含水量在最优含水量 W_{opt} 的湿侧,压实至稍低于标准普氏击实试验的最大干密度,以减少湿化引起的膨胀和湿陷。细粒土中的颗粒组成不同也对土体的级配产生影响,从而影响土体的工



程性质。毛洪录等(2003)通过对黄河流域粉质土的研究指出:黄河流域粉质土中砂粒和粉粒含量高,塑性指数低,砂粒和粉粒之间的空隙没有更多的细小黏粒来填充,孔隙中空气体积较大,引起击实曲线远离饱和曲线,按压实度(1997年颁布的标准)指标控制压实,土并未达到真正的密实,压实土体工后压缩性较大。

在国外,一些20世纪末期修建的路堤也出现了失稳问题,或者产生过量的沉降。有的道路在开放交通不久就出现了路面粗糙和凹凸不平,导致修复的成本大幅提高。White等(1999)分析指出:①路堤填筑施工期间,现场监理与施工技术人员对适合填土的经验鉴别技能和所依据的鉴别方法本身存在不足;②当前的施工验收规范存在问题。比如一点试验控制法并不是适合所有土类的现场压实度控制方法。在美国依阿华州除了对路基处理部位,规范对填土的含水量并不作具体要求。而对于黏性土,根据规范对凸块碾的压实要求,必须在标准葡氏最优含水量的湿侧碾压,并将填土压实到近于100%的饱和度。湿侧状态下超压导致路堤抗剪强度低(稳定性不足),随着填筑高度增大可能会产生正孔隙水压力并导致抗剪强度进一步降低,使得路堤边坡失稳势增大。对于无黏性土,用标准葡氏试验来控制凸块碾(带振动)的现场压实也是不合适的方法,因为标准葡氏试验所获得的无黏性土的最大干密度偏低,总体上会过高估计现场压实度。

湖南省为潮湿多雨地区,黏性土路基填料含水量普遍偏高,压实施工难度较大,但这也是湖南省公路路基压实中不可避免的一个问题。公路工程中吨位施工机械的使用,对达到新压实标准所要求的压实度提供了较好的保证,但对于湿黏土路基,压实过程中使用吨位施工机械或过多的碾压遍数,容易出现工程上所谓的“橡皮土”现象,可见,对湿黏土的压实制定一个合理的控制指标和标准是有必要的。Head(1980)提出适当压实土的概念(Proper compaction of soil),他认为不过于碾压土体与适当压实同样重要,特别是对于黏性细粒土,过分压实不仅浪费能量,且使土体更加容易破坏失稳,这对于堤坡和堤脚的土更为严重,只有适当压实的土才能达到最佳的效果。朱光耀(1995)和杨世基(1991)论述了在潮湿多雨地区,从湿黏土的工程性质出发,路基压实不应采用重型压实标准,而以稠度、饱和度指标控制压实较为适宜,并采取相应的技术措施。但对于黏性较小的一类细粒土,由于其稠度指标变化较为敏感,采用此指标进行压实控制往往难以达到满意的效果。《公路工程技术标准》(JTGB01—2003)对于潮湿黏性土的压实问题,同意适当降低压实标准,但未提出明确的控制指标,是目前路基施工控制中的一个空白点。对于湿黏土路基压实问题,应根据对潮湿多雨地区黏性土填料的物理力学性能测试,研究填土的饱和度、密实度与路基强度及压缩变形的相互关系,以路基整体强度和变形为质量控制目标,提出黏性土路基压实的合理控制指标及标准。

Proctor(1933)认为对于具体的土壤,其压实功相同则只有在一定的重塑含水量下才能得到最大的干密度。他采用内径11.7cm、高11.7cm、容积950cm³的金属容器和圆底直径5.1cm、重2.5kg的夯锤。夯锤自30.1cm高度下落,夯击在容器里厚约12cm的土层上,夯击25次,然后再在容器里加填土壤。共分三层击实,把高出容器多余的土壤削掉,计算土壤的干密度。变动土壤的重塑含水量,重复上述试验步骤就可以得到系列不同含水量下的干密度,即可求出最大干密度及对应的含水量(最优含水量)。施工时需要



土壤具有最优含水量的湿度,并且要压实到最大干密度,或者只许比最大干密度低几个百分点。为此,他研制了一个带有弹簧和细小压实头的贯入器,称为 Proctor 针,供现场检测压实度使用。随后,美国国家公路与运输协会标准(AASHTO)在 Proctor 试验的基础上制定了新的标准。新标准中,增大了夯锤的重量(4.54kg)和锤落高度(45cm),并分五层击实。修改后最大干密度提高了10%左右,最优含水量则相应降低2%~3%。新的标准只是把压实标准提高了,但为什么要采用这种标准依然没有谈得很具体。

苏联道路科学研究院于1937—1938年制定了标准压实法及开发了相应的仪器。夯锤的重量2.5kg,锤落高度30cm,分三层击实。但每层的击实次数根据土的种类而定:砂土60次、亚砂土75次、亚黏土及黏土120次。同样根据土壤的干密度和含水量曲线找出最优含水量和最大干密度。然后按照路堤的具体情况制定要求的压实度。压实度依据长期使用而稳定的道路和铁路路堤的最大土壤密实度而定,并且这些最大密实度大致相当于中等重量的路碾在层厚(10~15cm)和湿度接近塑限的情况下压实而得到的最大密实度。1955年以后,则采用了新的压实标准。这样选定压实标准的目的是要建成稳定而不沉降的路基,另外是为了提高路基上层的强度,以减少路面厚度。由于土壤上层密实度受季节性变化,可能破坏最初的压实效果,这种目的不是经常能实现。但随着混凝土和沥青路面的出现,路基土壤上层受季节性影响的程度得到了改善。苏联的压实标准采取不同路基部位选定不同的压实标准与 Proctor 采取最大干密度的控制标准相比是一大进步,并且前者对压实系数的选取依据作出了说明。Proctor 可能笼统地认为具有最大干密度的土壤具有最强的稳定性。但是,他未能就试验中为何采用这种重量的夯锤和击实次数作出说明。因为,最优含水量和最大干密度是随着击实功的变化而变化。

公路杂志社1959年刊文提出了路基压实标准的建议值,该标准主要从路基的稳定性出发,综合考虑路基路面的经济性为基本原则,提出一种方法来计算不同等级道路土基的允许沉降量,以此求得土质路基需要的密实度。该标准适用于修筑路基后立即铺筑路面开放交通的各等级道路,适合各地区的一般水文、气象和地质条件。《公路路基施工技术规范》(JTJ 033—95)中对于土质路基压实度标准,随着我国交通建设的快速发展,公路施工新技术、新工艺、新设备、新材料不断涌现且被广泛应用,但还缺乏统一的技术质量标准。随后,交通运输部2003年组织修改《公路路基施工技术规范》(JTG F10—2006)。依据交通量的增加和交通荷载的增大,将路基的压实度进行了相应的提高。新标准将高速公路、一级公路1.50m以下的路堤压实度标准从90%提高到了93%,1.50m以上各层分别提高一个百分点;二级公路1.50m以下的路堤压实度标准从90%提高到了92%,0.8~1.50m从90%提高到了94%,0~0.8m从93%提高到了95%;三级、四级公路也做了一些调整。

国外针对高含水量黏土的压实除制定重型、轻型标准之外,英国道路与桥梁施工规范(Specification for Road and Bridge Works, 1976)也是通过空气体积率(V_a)控制路基的压实状态,要求路堤上层的 $V_a \leq 5\%$ 、下层的 $V_a \leq 10\%$,还规定路基填料的含水量应低于塑限;美国对填土的压实度标准也考虑了土颗粒组成和填筑层位对压实度的不同要求,容许填方路基的含水量可以高达塑限的1.2倍,又同时规定黏土填料的液限不得超过



50%；日本根据土颗粒过孔径为 0.075mm 筛的通过量来确定土质路堤压实控制指标，通过量在 20% 以上的土用空气体积率 V_a 控制，而通过量在 20% 以下的土用密度比（即压实度） D_r 控制。密度比法与我国确定压实度的试验方法相同，但其空气体积率计算方法不同。利用空气体积率进行控制是考虑到在工地使用不同吨位和不同类型的压路机碾压时，各自的最优含水量和所能达到的最大干密度虽然不同，但达到最大干密度时，土中的空气体积率却几乎相同，土中始终保留有一定的空气体积。空气体积率不仅与干密度有关，也与压实含水量有关。干密度与压实含水量越大，空气体积率越小。可以看出：美国与日本的压实标准都较为具体地考虑了不同土质对压实效果的影响。前者将颗粒组成不同的土视为不同的材料，对 AASHTO 划分的 14 种土都确定了具体的压实度要求，细粒成分越多，要求达到的压实度越高。日本的路基压实控制方法中，先根据 0.075mm 筛的通过量将土进行分类，对不同的土质采用不同的压实控制方法。现行标准《公路路基设计规范》(JTJ D30—2004) 和《公路路基施工技术规范》(JTJ F10—2006) 则不论何种土质，均采用统一的压实标准。因此，国外的路基压实控制方法能使路基质量得到了更好的保障。另外，针对填筑含水量，我国在路基压实过程中对含水量的控制是基于怎样以最小的压实功达到规范规定的压实度。因为从压实曲线上可以看出，含水量过大或过小都不能或不易达到规定的压实度。国外对路基含水量的控制是针对不同的土质采用不同的压实标准，其目的是使路基压实后具有更好的稳定性。这些情况说明，国内外路基压实标准并不完全统一，确定路基的压实标准需要结合具体的填料特性。

按照规范，现场碾压时应该让土料的填筑含水量达到最优含水量。认为在最优含水量时碾压水分起着润滑作用，达到同样密实度所需要的压实功最少，也就是说最经济；另外，该状态下压实得到的土壤不仅最密实，而且浸水后密实度和强度减少得最少，并且是浸水后最稳定的土壤。这对于碾压达到最大干密度的情况是正确的，但是当前利用压实系数以后，要求达到的干密度 ρ_d 降低，但碾压含水量 w 并未相应地减少或增加。干密度折减的部分实际都转化为孔隙了，这些孔隙弱化了压实土体的抗压缩性能，同时也为水分的浸入提供了空间。所以，这样的折减存在弊端。鉴于此，在确定碾压含水量时，应利用大于最优含水量的湿度碾压，该湿度对应的干密度与折减后的干密度相等。这样在压实度不变的条件下，折减部分的孔隙也被水分充满，解决了以最优含水量碾压存在的问题。现行规范中，只对压实度要求作了明文规定，而对如何达到相应压实度的具体施工方法没有说明。因此，在实际操作过程中，作为施工方和监理方都只追求在碾压时能达到规范规定的相关标准，但对路基的这种因压实带来的优良性能是否在营运时期保持得住却极少关注，甚至是不关注，而很多路基病害的发生都因此而起。所以，在确定路基填筑控制标准时不仅要关注压实时和刚刚压实后的土壤作用情况，更要关注由于压实带来的优良性能是否长期保持。可见，特殊填料的填筑控制不能只以满足碾压标准为目标，更应从路基的长期性能出发，统筹兼顾。否则，即使满足现场要求，路基病害的潜势依然存在。尤其是在南方多雨地区，如何确定典型填料的碾压标准保证其良好的长期性能，是一个值得深入探讨的问题。



1.2.3 路基压实的数值模拟方法

凸块式振动压路机是一种振动平碾和凸块碾进行组合的压实机械,国外路基填筑施工证明该机械是适合用于碾压黏性细粒土。它借助重力与振动,以及凸块插入对土体产生挤压和揉搓的联合作用,产生较好的压实效果。目前,对凸块式压路机的静力压实作用机理研究主要集中在考虑凸轮对土体的“揉”“搓”作用功能分析上,虽然凸块式压路机在碾压黏性土壤中的优越性能已被广大工程技术人员所认识和了解,但认识还基本停留在定性分析层面。从凸块式振动压路机的振动碾压研究现状来看,当前及未来一段时期,振动研究的热点主要集中在以下两个领域:土壤的非线性特性和滚轮跳离被压材料带来简谐振动的畸变。苏联的哈尔胡塔(1957)对振动压路机与土壤系统作了比较详细的理论分析和试验研究,指出振动加速度是一个至关重要的因素,为了得到颗粒间较大的相对移动,破坏土层的原有结构,足够的加速度是必需的,此外,受压土壤的性质、受压土层的厚度及土壤的含水量等因素也影响压实的效果,这一研究为振动压路机—土壤系统的理论研究奠定了基础,但因当时的试验条件和认识所限,他们认为振动压实只适用于碾压非黏性材料。哈尔胡塔(1957)将土体视为完全弹性体,揭示机土耦合作用机理,而实际上压实土体的性质随着压实遍数的增加而发生变化,此外不同深度土体的性质也不同。在理论分析时,把压实土简化为具有一定刚度和阻尼的物体,必然导致理论分析结果产生误差。为此,严世榕(2000)建立了压路机与被压土壤间相互作用的非线性模型,讨论了振动压路机在非线性的状态下的动力特性,其结果更接近土壤压实过程中存在塑性变形的情况。Pietzsc(1992)提出了四自由度“机架—振动轮—土”系统的力学模型,该模型不仅考虑了土壤的阻尼、弹性,而且考虑了土壤的塑性、土壤的参振质量以及振动轮脱离地面等因素,根据振动轮是否跳离地面和土壤变形情况,将“机架—振动轮—土”系统的力学模型分为接触模型和跳离模型,在求解过程中根据判别条件,决定用哪一个模型进行求解,该四自由度模型看似精确,但涉及参数复杂,实际工程应用意义并不大。秦四成(2001)认为压实效果不仅取决于压路机结构特性和技术参数,还取决于土壤的性质和压实条件。在试验研究的基础上,对振动凸轮对土体的压实机理进行研究,考虑土体的非线性和凸轮的动力压实特性,建立系统的静动态压实机理分析方程将是本书的重点内容之一。

参 考 文 献

- [1] 沙庆林. 公路压实与压实标准 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [2] 冯忠居. 粗粒土路基的压实试验 [J]. 长安大学学报, 2004, 24 (3): 9-12.
- [3] 王士杰, 白永兵, 张梅, 等. 粗粒土路基的压实试验 [J]. 河北农业大学学报, 2002, 25 (4): 176-177.
- [4] 陈忠达. 风积沙路基压实技术的研究 [J]. 中国公路学报, 1999, 12 (2): 13-17.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. JTJ051-93 公路土工试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [6] 明福林, 王洪生. 黏性土的压实特性 [J]. 吉林水利, 1992, 5: 11-17.
- [7] 陈信翠. 黏性土液限含水量的工程性质 [J]. 四川水利, 1989, 10 (6): 44-46.