

黄土高填方路堤沉降变形规律 研究及工程实践

张卫兵 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

黄土高填方路堤沉降变形规律研究 及工程实践

张卫兵 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对近年来西部山区高等级公路建设中所面临的大量黄土高路堤因路堤变形过大、边坡失稳以及水毁等病害问题,以典型黄土高路堤为研究对象,借助室内试验、原位试验、离心模型试验及有限元数值分析等手段对黄土高路堤的沉降过程及其变形规律进行了深入、系统的研究;明确了黄土高路堤的沉降构成;分析描述了黄土高路堤的沉降变形规律及其发展变化特征;基本解决了黄土高路堤的沉降计算问题。本书理论与实践相结合,内容翔实,层次分明,具有较强的实用性,可为铁道、交通等行业设计与施工人员提供借鉴与参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高填方路堤沉降变形规律研究及工程实践 / 张卫兵

著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2013. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2141 - 4

I. ①黄… II. ①张… III. ①路堤—路基沉降—研究

IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 278643 号

书 名 黄土高填方路堤沉降变形规律研究及工程实践

著 者 张卫兵

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 212 千字

版次印次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着国民经济的快速发展,我国高速公路建设规模迅速增大。近年来,伴随着西部大开发战略的深入实施,使得西部地区公路建设有了长足的发展,一些高等级公路建设已延伸到相对落后的、广阔的、沟壑纵横的西部山区。西部地区由于地形、地貌条件复杂,加之高等级公路线形指标要求高,使得高填深挖现象不可避免,因此高填方路堤就成为一种常见的结构形式,而且大多数属于非饱和黄土路堤。由此引发的高路堤变形与稳定问题备受学术界及工程技术人员的高度重视。

为此,作者在研读国内外相关文献的基础上,针对西部山区黄土高路堤的沉降变形规律、沉降影响因素和沉降计算等问题开展了一些工作,现将研究成果编撰成书,以期为黄土地区高路堤的设计与施工尽绵薄之力。

本书的主要内容有以下几个方面:

① 首先通过一维固结试验,研究了压实黄土在各种工况下的次固结特性,探讨了固结状态、加载时间、加载比对压实黄土次固结系数的影响,揭示了次固结系数与压缩指数间的关系。其次,进行了不同压实度、含水量情况下一维蠕变试验,研究了高路堤填土在高应力下的流变特性,并在 Kelvin 模型基础上得出了变形随时间和应力变化的计算模型。

② 以黄土高路堤实体工程为载体,开展了黄土高路堤沉降原位试验研究。试验中通过布置沉降杯和压力盒等测试元件,对路堤施工及工后各过程中路堤横断面、填挖交界处以及路堤填土层间土压力与位移的变化规律进行了现场实测和分析。基于此对黄土高路堤的沉降构成进行了研究。

③ 借助离心试验手段,通过不同路堤断面形式,不同地形条件下的 10 组离心模型试验,着重对黄土高路堤沉降变形过程、“空间效应”对沉降变形规律的影响及黄土高路堤的湿化特性进行了研究。分析了加载期与稳定期沉降变化规律及其构成变化,并与原位试验进行对比。

④ 基于 MARC 有限元软件,从填土高度、边坡形式、路堤与地基弹性模量、弹性模量比及填土泊松比等方面对路堤沉降的影响因素展开深入的探讨,并分析了各因素对高路堤沉降构成的影响。同时对路堤填筑过程中存在“空间效应”的影响及路堤受水作用后的湿化性状进行了数值模拟计算,分析了“空间效

应”及湿化对黄土高路堤沉降变形与稳定的影响。

⑤ 进行了黄土高路堤自身压缩沉降计算及工后蠕变计算的研究。首先在一维分层总和法中引入压缩模量随填土应力变化的修正表达式,使路堤沉降计算能够考虑到不同土层压缩模量因填土荷载增加而变化的情况;其次针对高路堤填土变形的特性,提出了侧向变形影响的修正系数 K 表达式,使得高路堤沉降与路堤高度、边坡形式及填土特性建立了联系;最后结合室内试验成果给出了计算黄土高路堤工后蠕变沉降的实用计算方法。并将模型计算结果与现场实测、模型试验及有限元计算结果进行了对比,验证了计算方法的可靠性。

本书参考和引用了许多专家和学者的研究成果,在引用之处用参考文献编号予以明示,再次向文献作者表示衷心的感谢。

限于作者的学识和经验,书中难免存在一些不妥之处,诚请读者批评指正。

作 者

2013 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 高路堤的特点及其病害特征	1
1.1.2 立题背景及意义	2
1.2 高填方黄土路堤沉降研究评述	3
1.2.1 黄土高路堤沉降与变形规律的研究	4
1.2.2 路堤填土性状的研究	7
1.2.3 模型试验研究	8
1.3 主要研究内容	9
第 2 章 压实黄土性状的室内试验研究	11
2.1 压实黄土的次固结特性	11
2.1.1 试验背景	12
2.1.2 主固结与次固结变形特性分析	13
2.1.3 次固结系数 C_α 与固结时间的关系	14
2.1.4 正常固结压实黄土的次固结系数 C_α 值	14
2.1.5 超载预压处理后压实黄土的次固结系数 C_α 值	15
2.1.6 次固结系数 C_α 与压缩指数 C_c 的关系	17
2.1.7 加载比及加载时间对次固结系数 C_α 的影响	18
2.2 压实黄土变形的时效特性	20
2.2.1 一维固结蠕变试验	20
2.2.2 考虑流变特性的双曲线经验模型	26
2.2.3 三轴剪切及蠕变试验	28
2.3 小结	32
第 3 章 黄土高路堤沉降规律原位试验研究	34
3.1 工程概况	34
3.2 试验方案	34
3.3 原位试验成果分析	38
3.3.1 高填方路堤沉降规律分析	38
3.3.2 高填方路堤沉降因素分析	46
3.3.3 高填方路堤沉降构成分析	50

3.4 小结	52
第4章 黄土高路堤沉降过程的离心模型试验研究	53
4.1 试验目的	53
4.2 离心模型试验概述	54
4.2.1 离心模型试验技术	54
4.2.2 离心试验模型设备	55
4.3 离心模型试验方案设计	57
4.3.1 离心试验方案	57
4.3.2 试验模拟过程	59
4.4 试验结果分析	59
4.4.1 不同路堤断面形式下的沉降变形过程	59
4.4.2 不同地形条件下空间效应对沉降的影响	62
4.4.3 黄土高路堤的湿化变形	64
4.5 小结	66
第5章 黄土高路堤沉降变形有限元分析	68
5.1 仿真软件	68
5.2 模型建立	69
5.2.1 本构模型	69
5.2.2 非线性方程组求解	70
5.2.3 几何模型	71
5.3 沉降变形影响因素分析	72
5.3.1 路堤断面形式对沉降及侧向位移的影响	73
5.3.2 填土高度对沉降及侧向位移的影响	74
5.3.3 土体弹性模量对沉降及侧向位移的影响	76
5.3.4 土体泊松比对沉降及侧向位移的影响	80
5.4 空间效应分析	82
5.4.1 沟谷宽度的影响	83
5.4.2 地基与沟坡弹性模量的影响	85
5.4.3 沟坡坡率的影响	86
5.5 黄土路堤湿化变形分析	87
5.5.1 几何模型及参数选取	88
5.5.2 路堤湿化变形性状分析	88
5.6 实体工程有限元计算	91
5.6.1 计算模型及参数的确定	91
5.6.2 计算结果及其与实测值的对比分析	95
5.7 有限元计算与离心试验及原位试验对比分析	95
5.8 小结	96

第 6 章 黄土高路堤实用沉降计算方法	98
6.1 路堤沉降计算方法研究综述	98
6.1.1 主固结沉降计算方法	98
6.1.2 考虑蠕变的沉降计算方法	101
6.2 高路堤沉降的组成及影响因素	101
6.2.1 高路堤沉降的组成	101
6.2.2 影响路堤自身沉降的因素	102
6.3 高路堤沉降实用计算方法	102
6.3.1 高路堤一维沉降计算	102
6.3.2 考虑侧向变形的高路堤沉降计算修正	104
6.3.3 工后蠕变沉降的计算	111
6.3.4 考虑流变特性的黄土高路堤沉降过程计算方法	112
6.3.5 工程实例	113
6.3.6 本书沉降计算方法的适应性讨论	116
6.4 小结	117
第 7 章 结论与建议	118
7.1 主要研究结论	118
7.2 进一步研究建议	119
参考文献	121
后记	127

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着国民经济的快速发展,我国高速公路建设规模迅速增大。伴随着西部大开发战略的深入实施,西部地区公路交通建设事业有了长足的发展。然而西部地区自然条件和地理特点的特殊性,使该地区公路建设面临许多设计和施工中的技术难题,特别是这些地区的道路工程,如黄土路基、软土路基、盐渍土路基、冻土路基等。

近年来,随着西部大开发的深入,高等级公路建设已延伸到相对落后的、广阔的、沟壑纵横的西部山区。这些地区由于地形、地貌条件复杂,加之高等级公路线形指标要求高,使得高填深挖现象不可避免,因此高填方路堤就成为一种常见的结构形式,而且大多数属于非饱和黄土路堤。

1.1.1 高路堤的特点及其病害特征

高填方路堤的特点集中体现在一个“高”字上,也就是填筑高度很大,但目前还没有一个明确的概念。一般认为,以碎石、粗砂和中砂作为填料的路堤的极限高度为12 m,以其他材料作为填料的路堤的极限高度为20 m。《公路路基施工技术规范》(JTJ 033—95)将在水稻田、常年积水地带用细粒土填筑的路堤边坡高度大于6 m的边坡认定为高填方边坡;在其他地带填筑的填土或填石路堤边坡高度超过20 m的路堤边坡认定为高填方路堤边坡。《铁路路基设计规范》(TBJ 10001—2005)把路堤填筑高度超过20 m的路堤称为高填方路堤^[1]。处于黄土高原的西部山区在修建高等级公路时,黄土则作为主要的路堤填料,一般也将其归属为“填土路堤”。作为第四纪堆积物的黄土,与其他一般土相比,具有结构疏松、大孔隙、垂直节理发育、成分均匀无层理和遇水有湿陷性等特征^[2]。黄土的这些特性给路基工程带来了一定的困难,特别是在黄土地区修建的高填方路堤,受黄土的特性影响,在各种自然因素,尤其是荷载及雨水作用下,易产生各种病害,如坑凹、起拱、接缝台阶、碾压车辙、桥头或涵洞两端路面沉降等,影响公路的正常使用,造成了巨大的经济损失。

相对于低矮路堤而言,高填方路堤具有如下一些显著特点^[3]:

① 填筑高度大,必须对边坡的稳定性进行验算,要求路堤本身具有足够的整体强度和稳定性。

② 路堤的填筑面积和土石方工程量很大,难以保证其填筑压实的质量,后期沉降和稳定日益暴露的问题很多,对压实机具和压实遍数的要求很高。

③ 路堤的自重较大,造成路堤下地基土的沉降很大,在填筑过程中必须对地基的沉降进行监测,控制总沉降量和沉降速率,以保证地基土在填筑过程中不至于失稳而破坏。

④ 高路堤填料性能复杂多样,其工后沉降和差异沉降也是一个不容忽视的问题。一般

的低矮路堤在施工完成之后其沉降就基本趋于稳定,而高路堤的工后沉降要经过一段很长的时间才能完成,有时甚至几十年,且不同土质地段可能会产生差异沉降而影响公路的正常运营,所以对其工后沉降的计算及预测就显得非常重要。

也正是由于高填路堤自身的特点,加上设计和施工存在的一些技术难题,特别是沉降和稳定性控制等问题未能很好解决,使得高路堤病害时有发生。辛平(2000年)^[4]通过对甘肃境内 263 座黄土高填方路堤的调查后发现,稳定性欠佳、存在不同程度病害的高填方路堤有 127 座,病害率占所调查对象的 48.3%。其中由于水的作用引起的病害和施工中压实度不足造成过渡沉降引起的病害所占比重较大。郑治(2005年)^[5]等通过对已运营的 6 条高速公路共计 80 余段填方路堤(70%为高填方),其中有沉降病害的段落有 52 段。调查中发现,高填方路基或路堤的主要病害表现为:① 高填方填筑体的沉降超量和边坡破裂失稳破坏;② 由于地基强度不足致使高填方路基的沉降过大和边坡的失稳破坏;③ 填挖交界处由于地形变化产生差异沉降造成路面开裂。李启^[6]在对西宝高速公路病害调查后发现全线路基沉陷达 58 处之多,并且大多数出现在高填方路段。通过对沉陷路段的钻探资料进行分析计算,得出其路基含水量一般在 14%~28%之间,实地测得的干密度与室内标准击实试验确定的最大干密度相比,压实度多在 90%左右,不能满足规范的要求。从路面破坏情况来看,沉陷深度一般在 30~100 mm 之间,并且路基伴有侧向滑移迹象。由此可见,沉降和稳定是高路堤设计和施工中所面临的两大技术问题。

1.1.2 立题背景及意义

山区修建高等级公路常出现的高填方路基问题主要集中在两个方面:一是高填方路基的稳定性问题;二是高填方路基的沉降变形问题。这两个问题又包含着两个方面:① 填方下路基的稳定和变形问题;② 高填方路堤自身的稳定和变形问题。

路基沉降问题的研究从我国开始修建高等级公路时起就引起了重视。但长期以来,人们对沉降问题的研究主要集中在软土地基上。然而在高填方情况下,不仅存在软基的沉降问题,而且还存在由于填方荷载的大幅度增加而引起的一般沉降问题:在低填方下为良好地基,而在高填方的较大填土荷载作用下,却又可能表现为较大的固结沉降及较长的固结时间。实践证明,高填方段路面常因填筑体的沉降量尤其是工后沉降量过大而超出了路面结构层的容许范围,导致路面出现裂缝,行车不适,影响了行车安全。从目前对黄土地区已建成的高填方或坝式路堤的研究来看,如果填方路堤坡率、断面形式选择得比较合理,且施工质量能够得到保证时,路堤填方的自身稳定基本不成问题。而沉降变形,特别是路堤填土本身的沉降和工后不均沉降则成为主要问题。此外,路堤的沉降是一个与荷载、时间有关的过程问题。若路堤的填方施工期快,则施工期完成的沉降量小,工后残留的沉降量大,这样虽可尽早开通运营,但运营期路面可能因不均匀沉降开裂而增加维修费用。若在填土完工后预留一段时间的固结期,当土体的沉降达到某一水平后再铺筑路面并开通运营,这样就可减小工后沉降值,相应减少运营维修费用,但却因推迟运营日期而承受一定的经济损失。由此看来,在高填方路堤设计中加强高路堤沉降变形规律的研究,正确估算施工沉降量及工后沉降量是设计研究人员所面对的一个重要问题。

随着高等级公路的不断发展,对以容许工后沉降量作为设计控制的指标也提出了日趋严格的标准。从国外来看^[7],1967 年日本道路协会《道路工程指南》曾经规定:当土方工程结束后立即铺筑高等级路面时,路堤中心处剩余沉降量的限值,对一般路段为 10~30 cm;

与桥梁等邻接的填土部位为 5~10 cm。而最新的日本《高等级道路设计规范》已不考虑容许工后沉降。考虑到即使采用经济的施工方法也不能减少长期沉降(这里指次固结沉降)、地基沉降量随时间的变化关系难以预测及道路填方的长期沉降量可以在维修管理阶段得到控制等原因,已把重点放在填方的稳定分析上,而将工后沉降的问题则放在后期的养护中解决。尽管这样可以减少一次性投资,但养护工作的质量水平、所用机械的自动化程度必须有一定的要求,否则必然影响道路的运营效率。相比而言,法国和美国对桥头的差异沉降控制却是非常重视,分别给出了相应的限值。德国要求更严,要求通过预压达到控制次固结沉降的目的。从国内的情况来看,在“六五”期间交通部重庆公路科研所主持的“利用经济可行的办法进行软基处治的设计”课题中已涉及对这一问题的研究。根据对桥头引道以及一般路段实测沉降结果的分析,参考日本和美国的标准及国内建工部门对建筑物基础容许沉降的要求,对容许工后沉降提出的建议是:中低级公路以稳定为主,路堤中心处容许工后沉降量不作规定,视使用情况通过养护弥补。对于高等级公路铺筑路面 20 年内,邻近桥梁等人工构筑物的路堤段的容许值为 10~20 cm,其他路段为 30~55 cm。相比而言铁路方面要求更严,如《京沪高速铁路桥隧站设计暂行规定》规定^[8]:路基工后沉降量一般地段不应大于 10 cm,桥台台尾过渡段路基工后沉降量不应大于 5 cm。这使得考虑工后由土体次固结产生的沉降成为必要。

现有的土本构关系及应力、应变计算方法主要用于最终沉降量的计算,与时间过程无关;饱和土的固结理论虽然考虑了时间因素,但却很难模拟随机加载的路堤施工过程及路堤土体的非饱和性质;非饱和土的固结理论虽考虑多因素的影响,但由于其计算参数获取的困难也限制了其发展;虽然流变理论能够同时考虑应变、应力和时间三维相互关系,但目前流变理论主要用于对软土体、岩体的变形进行研究,而对用于非饱和填土体沉降过程的研究成果则较少。这主要是由于公路工程的线长面广,涉及的工程地质情况多变,而且对某一个计算点上其沉降计算的重要性没有水利和工民建等工程那么重要的缘故。因此,本着工程需要、计算方法实用、可靠以及经济的原则,去探求一种简单实用的填土体沉降过程计算方法具有重大现实意义。

随着西部地区公路交通事业的大发展,我国在黄土地区修建高速公路的规模越来越大,黄土高路堤将大量涌现。为使建成的公路具有良好的使用性能,尤其在高速公建设标准日趋严格的今天,能否合理解决高路堤的设计施工中沉降与稳定问题,直接关系建设的成败。为此,深入研究黄土高路堤沉降变形发展规律,解决黄土高路堤的沉降变形以及水作用下的变形等问题具有重要的学术价值。

1.2 高填方黄土路堤沉降研究评述

路堤沉降是一个古老而复杂的课题,它的研究集中于两个方面的内容:总沉降量和沉降随时间的发展过程。国外修建公路大多数采用矮路堤的形式,对于极个别较高的路堤也一般为高架桥所代替,所以路堤沉降问题并不突出,相应地,对这方面的研究也较少。由于本研究涉及黄土高路堤沉降变形规律、沉降计算以及环境(水)作用等方面,现仅将与其有关的一些研究进展综述如下。

1.2.1 黄土高路堤沉降与变形规律的研究

(1) 调查分析认识阶段

20 世纪 60 年代以前,为了提高新填土路堤的质量,进行了大量的调查、分析。甘肃是全国研究黄土地区高路堤(土桥)问题最早的省份之一,早在 50 年代末期,张是皓^[9]等人就对陇东地区的黄土土桥进行了调查,提出了修建改进意见。特别是对黄土的自拱性问题进行了研究,认为这是土桥能保持稳定的原因之一。同时,对修建无衬砌黄土土桥之可能性及其设计问题进行了探讨,提出了天然拱圈曲线方程 $Y = x^2/f \cdot b$, 即抛物线形。拱上土层最小厚度为 3 m,拱脚垂直边墙最小厚度亦为 3 m,并在平凉修建了试验工程。建议对路堤或黄土土桥在沟底以下 3 m 可用 1:0.7~1:0.8 的边坡,留 1 m 宽的台阶,其上 5~6 m 用 1:0.5 的边坡,再留 1 m 宽的台阶,在其上可用 1:0.2 的边坡,认为这样的边坡对于高 20 m 的路堤或土桥是合适的,低于 20 m 的土桥可减小边坡。

同期,陕西交通设计院和同济大学组成黄土调查组^[10],集中调查了陕北咸宋公路的宜君至洛川段,调查后认为,在跨越深沟时,由于冲沟附近的地形和路线的高度,在技术上和经济上不可能建造一般的高路堤,也同样不可能建造高架桥,宜建造土桥来跨越冲沟。所调查的 12 个土桥中,最高的在洛川至石家庄(南)K222+850 处,高 61 m,桥长 27 m,边坡 1:0.33,3 m 高留 1 m 的台阶,最低的在洛川县(南)K224+500 处,高 6.7 m,桥长 72.2 m。调查土桥的填筑土壤大都为粉砂质亚黏土,认为土桥的边坡稳定性问题,只要土桥在填筑时不塌,则使用时一般稳定。

(2) 半定量分析研究阶段

20 世纪 80 年代以前,由于高等级公路在我国还未出现,大多学者还没有普遍认识到路基沉降变形,特别是路堤和天然地基的共同变形问题对高等级公路的重要性和必要性。由于铁路部门较公路部门对路基沉降要求严格,所以我国铁路部门较早于公路部门从事路堤和路基沉降方面的研究。铁道部科学研究院西北研究所的贾士谔^[11](1978 年)和楚华栋^[12](1987 年)分别对黄土高路堤做了下沉试验研究,并根据实测资料分析了路堤的沉降规律。认为黄土碾压施工中采用重型压实机械是必要的,并应注意选用路堤填料,提高路堤的压实力,预留下沉量。

1984 年,铁一院^[13]线路路基处和铁道部第十二工程局第四工程处在陕西省东坡矿支线的杜康沟车站西端修建了高路堤,长 210 m,最大填土高 65 m,底宽 270 m,该路堤在 1987 年特大降雨中仍安然无恙,竣工后测试结果表明,其沉降量小于 1%。根据观测资料,建立了竣工沉降量与路堤高度之间的经验关系,并提出了沉降量与时间的函数关系。结果表明,总沉降量的 60% 发生在竣工后的第一年,建议对高于 20 m 的路堤的压实系数,基床部分应达到 0.95,基底部分应达到 0.90。当压实系数 $K=0.90$ 时,竣工后沉降量 $S = \frac{H}{4.5H+64} + 0.00652H$ 。

柴锦春^[14](1988 年)认为路堤自身的沉降可分为施工期的沉降和竣工后的沉降两部分,而竣工后的沉降又可分为在自重作用下的沉降和列车动载引起的沉降两部分。同时采用平面有限元方法,对南同蒲与陇海铁路联络线上的田家沟黄土高填土路堤,在施工期和竣工后的沉降进行了计算,其结果与实际相符。田家沟为切割渭河三级阶地形成的 U 形沟谷,沟壁坡度 $40^\circ \sim 50^\circ$,路堤最大填筑高度 32.33 m,顶宽为 11.04 m,沟底以下 20 m 边坡为 1:2.0,其上 6 m 为 1:1.75,顶部 6 m 为 1:1.5,填土的干容重 $\gamma_d = 16.5 \text{ kN/m}^3$, $\omega_p =$

17.3%。该路堤在施工期实测最大沉降发生在离堤顶约 24 m 处,其值为 185 mm,竣工后 16 年表面观测沉降实测为 242 mm。

左佐生^[15](1988 年)通过分析认为提高压实系数可以减小施工预留量,并得到压缩系数 E_s 、相对压缩量 $\Delta H/H$ 与压实系数 K 的关系曲线,最后建议填土预留沉降量(相对压缩量)如表 1-1 所示。

李善皋^[16](1989 年)认为路堤顶面以下沉降量是路堤本身及基地土层在填土静载和列车动载作用下产生的压缩变形之和,并采用单向压缩分层总和法计算总沉降量。

表 1-1 填土预留沉降量

土类 位置	黏性土 K (压实系数)			砂性土 D_r (相对密度)	粗粒土 K_{30} (地基系数)	
基底表层	$K > 0.95$	$K > 0.95$	$K > 0.97$	$D_r > 0.75$	$K_{30} > 12$	$K_{30} > 15$
基底底层	$K > 0.90$	$K > 0.90$	$K > 0.95$	$D_r > 0.70$	$K_{30} > 10$	$K_{30} > 12$
路堤下部	$K > 0.85$	$K > 0.85$	$K > 0.90$	$D_r > 0.65$	$K_{30} > 8$	$K_{30} > 10$
预留沉降量	1%~2%	0.5%~1%	0.1%~0.5%	0.5%~1%	0.5%~2%	0.1%~1%
备注	填土施工含水量低于最佳含水量时取低值,超过时取高值			级配差取高值	水稳定差取高值	

(3) 定量分析和综合研究阶段

进入 20 世纪 90 年代以后,随着高等级公路建设的迅速发展,研究工作者借助于各种手段对路堤的变形开展了一系列研究。这一时期的主要成果有:

1991~1993 年,成都科技大学、甘肃省交通厅公路局及甘肃省交通科研所联合在国道 312 线西兰公路开展了《黄土地区公路特殊结构的研究》(交通部“八五”行业联合攻关计划所属课题)^[17]。该课题在对沿线现有坝式路堤进行深入现场调查研究的基础上,通过大量的物理力学试验,建立了饱和与非饱和黄土的本构关系模型;利用离心模拟方法对黄土高路堤进行了平面及三维离心模型试验研究;采用三维非线性有限元方法,对高路堤及冲沟体系的空间变形和应力分布进行了分析。通过对黄土高路堤的性态进行全面系统的试验研究、模型模拟和数值计算分析,对黄土高路堤设计与施工提出了许多有益的改进措施。

原西安公路交通大学戴经梁、王晓谋^[18]等在交通部“八五”行业联合科技攻关项目中以非饱和土的混合物固结理论为基础,利用非线性有限元研究了陕西省黄土路堤沉降规律,并提出黄土路堤沉降防治措施。研究表明:

① 新填土堤身的压缩变形是不可避免的,但在压实度较高时,路堤自身变形量较小;路堤越高,施工速度越快,路堤自重引起地基的沉降越大,当地基情况较差时,地基沉降量占整个路堤沉降的大部分。

② 较高的压实度能使路堤自重压缩变形随时间完成的较快,而且变形量较小。

③ 在路堤施工前,对天然地基进行适当处理是防止工后超标准沉降的有效措施。

④ 路堤自身压缩变形稳定所需时间比地基沉降稳定所需时间短,对 3~10 m 的大多数路堤,完成工后沉降的时间一般为 1~2 年。

在定量分析方面,郝传毅等(1991 年)^[19]用非线性有限元对新填路堤土的自身压缩问

题进行了研究,其结果对轻型压实标准路堤的变形研究和设计都有一定的帮助,但由于采用了邓肯—张模型作为土体的本构模型,计算参数较难获取,故难以推广应用。1992年魏汝龙、谢新宇等^[20,21]基于土体中一点的一维应力应变关系,提出了用应变定义的固结度与按应力定义的固结度之间的换算关系,直接根据土体中一点的任意时刻的有效应力与应变的关系建立沉降公式。郑治(1996年)^[22]在分析路堤填土自身压缩特点的基础上,对目前通常使用的分层总和法进行了改进,采用逐级加载的方法计算填土自身压缩量,并用 Terzaghi 的一维固结理论对填土的固结沉降作了近似计算。与前者相同,其计算方法都是基于一维条件下得出的,没有考虑到土体侧向变形对沉降的影响。杨重存(1998)^[23]在对黄土进行了微观结构观测和矿物成分分析及物理力学特性试验的基础上,提出了反应黄土基本性质的 K-G 模型。吴燕开^[24](2004年)等针对西安地区黄土提出了非饱和黄土的加载体积流变模型。刘保健^[25](2005年)结合实际工程,对饱和软土地基和黄土填方路堤的沉降过程进行了大量的实测,揭示了大量有关公路路堤沉降变形的规律。通过对现场土样进行了室内试验并结合理论分析,提出了碾压黄土路堤沉降过程计算方法、黄土地基增湿过程和增湿湿陷计算方法。此外,原西安公路交通大学伍石生^[26](1996年)用灰色系统理论预测了黄土路堤沉降规律。原西安公路交通大学钟厚冰^[27](1999年)利用清华 THEPD 程序对西宝高速公路竣工后变形进行了分析。研究指出,竣工时的最大沉降并不是出现在路堤顶中部,而是出现在原地表中部。高维隆^[28](2000年)对公路黄土坝式路堤的沉降、渗漏、稳定性与设计做了一定的研究。

原位试验方面,孟宪侵^[29](2001年)通过对太原市东山过境高速公路两处大型黄土高路堤实地沉降观测试验的研究指出,高填方路堤沉降变形由基底沉降和填土压缩变形两部分组成。通过对实测结果分析,认为基底沉降为总变形的 $1/3 \sim 1/4$;初始沉降和固结沉降在施工期间基本完成,竣工后的沉降主要为次固结沉降,约为施工期间总沉降的 8%;竣工后路面沉降约为最高填土厚度的 1%。另外还指出“V”形沟谷具有明显的土拱作用,土中应力重分布,具有明显的卸荷作用。刘涌江等^[30](2005年)以云南安楚高速公路第 9 合同段高填方路堤为依托工程,根据高速公路路堤修筑过程中常见情况,以数值计算为手段,全面研究了高速公路路堤的稳定性与沉降变形规律,为高填方路堤的建设提供了有效的技术支撑。

综合调查分析方面,辛平^[3](2000年)对甘肃 263 座黄土高填方公路路基进行了调查,并在实地进行了压路机压实和强夯击实试验。在此基础上,比较和探讨了原状黄土和击实黄土的性质,分析了黄土高路堤现状和病害,提出了已建路堤稳定性评价及新建路堤的沉降和稳定性计算方法。刘怡林^[31](2001年)在对黄土土性参数、坡高、坡度等因素与稳定系数的关系进行系统分析的基础上并结合工程实际,对可能的路基断面形式进行了稳定性分析与评价,提出适用于甘肃省黄土地区特殊路基边坡的合理断面形式。这些为黄土地区高路堤、深路堑边坡的设计和施工提供了理论依据。徐世强^[32](2002年)将土坝和建筑地基设计理论和方法引入公路坝式路堤设计,提出了关于坝式路堤设计的结构型式、稳定设计、沉降设计、地基设计及渗漏设计等一整套方法。并结合实例加以论证,对黄土地区的公路建设具有一定的参考价值。郑治^[33](2005年)在其“高填路堤沉降变形规律研究及压实技术课题成果简介”中全面总结了西部课题“高填方路堤沉降变形规律研究及压实技术”中针对高填方路堤典型病害、高路堤沉降计算方法、高路堤工后沉降预估方法以及典型填料压实技术等方面所取得研究进展。该研究对完善有关规范和提高我国山区高等级公路建设质量将起

到积极作用。

1.2.2 路堤填土性状的研究

(1) 路堤填土静力学性状

姜旺恒^[34](2004年)、陈开圣^[35](2006年)通过对压实黄土的直剪和单轴压缩试验,分析了压实黄土强度和变形指标随物理指标含水量、干密度(压实度)以及压力等单因素而变化的规律,并运用正交试验的数据分析方法,确定以上因素及其交互作用对强度和变形指标的贡献大小。

景宏君等^[36](2004年)在分析了压实土体的湿陷性、水分入渗对其饱和度、渗透系数等的影响和抗剪强度随压实度、含水量的变化规律后指出:严格控制土体含水量,提高路基压实度标准是提高黄土路基整体稳定性的关键。

刘建民^[37](1994年)等在分析了压实黄土的强度及强度参数随压实度和含水量的变化规律后认为,黄土现场压实作业时高效而经济的含水量为塑限含水量 ω_p 。

杨有海等^[38](2003年)通过对宝中铁路黄土路堤的取样试验,得出了压实度与含水量对压实黄土抗剪强度的影响程度及趋势,为黄土路堤病害的预防和治理提供了相应的依据。

此外,李晓军^[39]通过CT、扫描电镜图像从微观结构定量化的角度对用方向性孔隙度表征不同压实度下压实黄土的定向性做了尝试。

李传勋^[40](2003年)通过室内一维压缩试验,探讨了压实黄土的应力—应变关系。同时将割线模量计算沉降的方法应用到高填方路堤自重作用下的最终沉降计算中,并建立了可同时考虑力、变形和时间的非饱和压实黄土路堤一维沉降计算模型。另外还对高填方路堤工后沉降的组成进行了分析,得出了施工组织方式对工后沉降量的影响很大的结论。

马莉英等^[41](2004年)在对现场黄土试样剪切蠕变试验的基础上,以分数线型蠕变方程为理论,模拟了黄土的蠕变、强度和流变特性,得到了黄土剪切模量随时间和法向应力的变化规律。

王有余^[42](2005年)通过对不同应力水平下黄土蠕变试验数据的分析,认为黄土属非线性黏弹性体。

程海涛(2005年)^[43]根据室内固结试验,分析了非饱和重塑黄土的割线模量,并从流变学的角度分析了土体的变形特性,提出了用双曲线与对数模型来描述非饱和重塑黄土应变随时间的变化过程。

(2) 路堤填土动力学性状

胡瑞林^[44,45]进行了动荷载作用下黄土的强度特征、结构变化机理及其微观分析研究,对黄土的工程性质和微观结构定量化做出了有益的探索。

张栋梁^[46](2004年)借助GDS动三轴仪,对压实黄土在不同干密度、含水量、固结应力比和不同固结应力情况下进行了耦合试验,探讨了压实黄土的动本构关系、动弹模和阻尼比、动变形和动强度这三个方面的动力特性及其随固结压力、含水量、干密度和振次的变化规律。

张晓荣(2005年)^[47]借助GDS动三轴仪,在应变控制条件下,对压实黄土进行动力条件下的应力松弛特性研究,得出应力松弛随湿度、围压、激振频率和初始应变变化的关系。对压实黄土在动力下的松弛机理进行了解释,并且给出压实黄土在动力下的应力应变随随时

间的变化的表达式。

周勤(2006年)^[48]通过压实黄土的室内回弹模量试验、湿陷试验、动三轴试验和抗剪强度试验,分析了压实度和含水量对压实黄土的静态回弹模量、附加压缩变形、动模量、动阻尼比和抗剪强度力学性质的影响。试验发现,在常用的95%的压实度基础上继续提高压实度对于提高压实黄土的回弹模量和抗剪强度仍然很有效:压实度达到90%以后,压实黄土浸水时产生的附加压缩变形基本可以消除。试验结果为黄土地区路基压实标准确定以及回弹模量、抗剪强度等取值提供了依据。

(3) 路堤填土湿化特性

路堤填土在浸水前是非饱和的,尽管施工中碾压,仍然不能很密实。浸水后土颗粒间受水的润滑作用在自重作用下将重新调整其间位置,改变原来结构,使土体压缩下沉,这种现象称为湿化。黄土的湿化是黄土地区独特的工程地质特性,它给公路部门带来的地质灾害问题已经越来越多地引起国内外工程师们的关注。关于原状黄土的湿陷机理、影响因素及评价方法等问题,国内外已有较多的试验研究,且取得了丰硕的成果。用于填筑路堤的重塑黄土是否具有湿陷性以及如何评价等问题尚未引起足够的重视,也没有形成一致的看法。

水利部山西省水利水电勘测设计院贾茂林^[49]对不同地区原状黄土与压实黄土湿陷性试验表明:湿陷性黄土经过压实后,如填筑含水量较低,填筑干密度较小,仍具有明显的湿陷性。

原西安公路交通大学伍石生(1996年)等^[50,51]对压实黄土的湿陷性及渗水特性等进行了研究,认为压实黄土和原状黄土的含水量、干容重均相同时,压实黄土的湿陷性大;压实黄土的含水量相同而干容重有所提高时,仍具有湿陷性,且在一定压力范围内随压力增大而增大。随后,于1998年又利用S—2700型扫描电镜研究压实黄土的骨架颗粒接触关系、连接方式和孔隙类型及分布特征,从微结构角度对压实黄土的渗水机理进行了解释,从而阐明了压实黄土路基遇水往往还发生破坏的原因。

西北水科所的张贵发等^[52]通过300多组次的试验研究表明:压实黄土在含水量、干密度不变的情况下,其湿陷性随龄期的增长而增加,这是压实触变性的影响,其实质是土颗粒的弹性效应,龄期越长,压实土结构越趋向絮凝状态,第一次浸水变形就越大。

任钰芳等^[53]将路基土的吸力引入公路工程中,研究了非饱和黄土初始吸力与工程性质指标的关系,提出了适合本地区黄土特性的基质吸力与含水量、黏聚力、先期固结压力关系等的拟合公式,同时还对黄土地区灌溉机理及其对路基稳定的影响进行了试验研究,提出了黄土路基边坡稳定性的分析方法及路基沉陷病害防治措施。

沈波(2003年)等^[54]系统地进行了压实黄土路基边坡的七大因素(降雨、坡角、坡长、坡高、压实度、土质、施工方法)变化条件下降雨冲刷试验研究,得出西安和甘肃压实黄土边坡降雨冲蚀强度经验公式、坡面最大冲刷强度的临界坡度等系列结论,对压实黄土路基坡面防护设计具有积极的指导作用。

1.2.3 模型试验研究

模型试验作为研究黄土路堤沉降问题重要手段之一,也有着丰硕的成果。

西安理工大学^[55]利用小型土工试验场填筑4 m高黄土路堤,研究了黄土路堤在自重作用下的压缩变形沉降规律。研究指出,矮路堤沉降稳定大概需要一年时间;通过提高路堤压实标准可以减小路堤压缩变形量。同时得到路堤高度与自身最大压缩沉降关系预测模型。

长沙理工大学秦仁杰等^[56]通过室内模拟沉降试验得到了黄土的沉降规律以及短期荷载和长期荷载对沉降的影响;同时还得出在长期荷载作用下沉降的拟合曲线方程,为黄土路堤后期沉降的预测以及建立沉降本构方程提供参数。

以上两者通过模型试验研究了黄土路堤的变形规律,但由于模拟路堤高度有限,没能反映出高路堤情况下的特殊性。

岳祖润(1996年)^[57]通过四组土工离心模型试验,得到了压实细粒土路堤中应力和位移分布。同时分析了路堤沉降与压实系数、填土高度及加荷情况的关系,提出了一种新的路堤沉降预测和控制方法。

章为民(1997年)^[58]依据相似理论从离心模拟的加速过程入手,用加速度的增加过程来模拟坝体逐步升高的过程,并建议了一个简便的分析方法,用这一方法可以得到符合实际的变形分布,最大值也基本合理。

熊冰(1999年)等^[59]根据黄土地基上的筑路特点,运用离心模型试验研究了黄土路基的特性,获得了在不同路基深度及不同路堤高度下黄土路基因降雨等引起的湿化沉降与水平变形分布及路堤破坏情况,并对其分布规律和破坏原因进行了分析。

胡小明(2002年)等^[60]根据黄土地区的工程实际状况,运用离心模型试验研究了黄土高路堤($H=30\text{ m}$ 和 $H=63.8\text{ m}$)特性,研究了高路堤填土在不同干容重分区下不同路堤边坡在无水、挡水、边坡淋水作用时高路堤的稳定情况及其位移与应力状况。

刘宏(2003年)等^[61]等以西南地区某机场为工程背景,利用离心模型试验系统研究了高填方地基的变形特性。同时指出,对于试验所用土体,高填方地基的沉降特征为“沉降大,压实快”,沉降主要发生在施工期间,施工后沉降量小于总沉降量的10%。

范亮(2004年)^[62]则通过室内模型试验对高填方路堤在浸水情况下的变形特性进行研究,探讨了水位高低、路堤高度、加筋、填料性质等因素对浸水高填方路堤侧向变形和竖向变形的影响。认为加筋能有效地减小浸水高填方路堤的侧向位移和竖向位移,起到防止路堤填土层底部开裂和提高路堤稳定性的目的。

景宏君(2004年)^[63]以高69 m的黄土高路堤为研究载体,通过离心模型试验和非饱和土三维数值解析分析,研究了黄土高路堤沉降的特点及土体应力于位移的变化趋势,并得出振动压实与黄土高路堤沉降变形的关系规律,同时从振动压实的角度出发,对高路堤应力、位移变化剧烈处提出应做特殊处理的建议和措施。

综上所述,国内外对黄土路堤沉降及路堤压实黄土的变形特性等问题的研究由来已久,且取得了一定的成果。但上述研究路堤沉降都是结合某一实体工程而展开的,且只考虑特殊、单一的变形情况,研究不具有广泛性,因而不便于推广。此外,对黄土路堤沉降规律的研究大多数是针对原来的低等级公路来开展的,基于高等级公路的研究较为匮乏。因此,有必要进一步研究黄土地区高等级公路下高填方路堤沉降变形规律及其沉降过程,探索黄土高路堤的实用沉降计算方法,解决黄土高路堤设计和施工中的关键技术,为完善相关的技术规范提供理论依据和工程实践经验。

1.3 主要研究内容

在总结前人研究成果和其存在问题的基础上,本书通过多种手段,围绕黄土高路堤的沉