

GONGLU LUJI CHENJIANG YU WENDING GUANCE JISHU

# 公路路基沉降与 稳定观测技术

郑长安 黄 斌◎编著



人民交通出版社  
China Communications Press

# 公路路基沉降与稳定观测技术

郑长安 黄 斌 编著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是在总结大量实践经验和文献研究的基础上,以多个实体工程的观测项目为依托,介绍了路基沉降与稳定观测技术和方法。内容包括:路基沉降与稳定分析、路基沉降与稳定观测、路基沉降与稳定观测要求、观测数据处理与分析、路基沉降预测、路基沉降与稳定观测报告的编写、观测组织与管理等相关理论及方法的阐述分析。

本书理论与实践并重、条理清晰、编排合理、可操作性强,可直接作为观测指导用书,还可供路基施工、设计、监理等相关技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

公路路基沉降与稳定观测技术 / 郑长安, 黄斌编著

—北京:人民交通出版社,2012.9

ISBN 978-7-114-09984-7

I. ①公… II. ①郑…②黄… III. ①路基沉降—观测 IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 178864 号

书 名:公路路基沉降与稳定观测技术

著 作 者:郑长安 黄 斌

责任编辑:刘永芬

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)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京交通印务实业公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.75

字 数:258 千

版 次:2012 年 10 月 第 1 版

印 次:2012 年 10 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09984-7

定 价:28.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

随着我国公路,特别是高速公路的蓬勃发展,公路承担了相当比重的关乎国计民生的运输任务。因此,修建安全、平稳、舒适、高质量的公路成为突破国民经济发展瓶颈的关键。高等级公路为汽车的高速行驶提供了一个高平顺性和稳定性的基础,而路基作为高等级公路的结构基础,必须在运营条件下将线路的设计参数保持在要求的标准范围之内,这就对高等级公路的沉降稳定提出了很高的要求。

路基的沉降与稳定观测是一个复杂的系统问题,也是高等级公路路基设计和施工的关键。由路基沉降变形导致公路路面结构的破坏,直接影响到公路的使用品质和寿命,给国民经济带来巨大的损失。因此,路基的沉降与稳定观测既是保障公路路基工程质量的需要,也是公路工程科学设计、科学施工的重要体现和基本要求。

本书作者大量收集有关文献资料,并结合多年来主持或参与工程实际应用等实践经验的基础上,比较系统地阐述了路基沉降与稳定观测技术的相关内容,包括观测方法、观测要求、数据分析、沉降预测、报告编写及其观测组织管理等。本书遵循以实际变形监测数据为依据,采用科学的方法对路基的沉降变形综合分析和评估,验证设计并检验施工质量,全面掌握路基的变形动态,分析和推算路基的最终沉降量和工后沉降,对公路工程建设有重大的指导意义。

本书共分为八章,各章既可独立成篇,又相互关联。其中第一、二、三、四、五章由郑长安编写;第六、七、八章由黄斌编写;本书的插图和表格由涂治军绘制;本书编写过程中得到了众多同事的大力协助,在此一并感谢。

限于作者水平,书中疏漏及不足在所难免,恳请读者和同行批评指正。

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第一章 绪论                 | 1   |
| 1.1 引言                 | 1   |
| 1.2 公路路基沉降与稳定观测的意义     | 2   |
| 1.3 公路路基沉降与稳定观测的目的     | 4   |
| 1.4 公路路基沉降与稳定观测的原则     | 6   |
| 1.5 公路路基沉降与稳定观测的主要内容   | 6   |
| 1.6 路基沉降与稳定观测技术的发展状况   | 9   |
| 第二章 路基沉降与稳定分析          | 13  |
| 2.1 公路路基的类型及构造         | 13  |
| 2.2 路基沉降分析与计算          | 15  |
| 2.3 路基边坡稳定分析及验算        | 25  |
| 第三章 路基沉降与稳定观测          | 41  |
| 3.1 路基沉降与稳定观测的方法       | 41  |
| 3.2 主要观测仪器介绍           | 51  |
| 3.3 路基沉降与稳定观测          | 56  |
| 3.4 路基典型断面沉降与稳定观测      | 79  |
| 第四章 路基沉降与稳定观测要求        | 90  |
| 4.1 路基沉降与稳定观测实施的基本要求   | 90  |
| 4.2 路基沉降与稳定观测精度        | 91  |
| 4.3 路基沉降与稳定观测频率        | 98  |
| 第五章 观测数据处理与分析          | 100 |
| 5.1 单点沉降观测数据处理与分析      | 100 |
| 5.2 路基侧向水平位移观测数据的处理与分析 | 105 |
| 5.3 路基坡脚处水平位移数据处理与分析   | 111 |
| 5.4 路基全断面沉降观测数据的处理与分析  | 115 |
| 5.5 路基边坡沉降与稳定观测        | 117 |
| 第六章 路基沉降预测             | 124 |
| 6.1 曲线拟合法              | 124 |
| 6.2 灰色系统法              | 129 |
| 6.3 人工神经网络法            | 132 |
| 6.4 遗传算法               | 136 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 6.5 其他曲线预测方法简介 .....            | 138        |
| 6.6 路基沉降预测方法比较 .....            | 139        |
| <b>第七章 路基沉降与稳定观测报告的编写</b> ..... | <b>141</b> |
| 7.1 报告的类型及其作用 .....             | 141        |
| 7.2 报告的编写内容 .....               | 141        |
| <b>第八章 观测组织与管理</b> .....        | <b>152</b> |
| 8.1 人员、设备、驻地建设准备工作 .....        | 152        |
| 8.2 观测元器件的质量保证 .....            | 154        |
| 8.3 观测地段的确定 .....               | 156        |
| 8.4 观测工作的组织 .....               | 157        |
| 8.5 观测资料管理 .....                | 159        |
| <b>参考文献</b> .....               | <b>164</b> |

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

20 世纪 80 年代以来,我国确立了将交通和能源置于国民经济发展建设的首位,公路承担了相当比重的关乎国计民生的运输任务。随着社会经济的发展和人民生活水平的日益提高,民众对运输的需求也会不断提高,修建安全、平稳、舒适、高质量的公路是突破阻碍国民经济发展瓶颈的关键,也是全国人民迫切希望解决的基本问题。近年来我国公路建设进入了快速发展的时期,2010 年我国新增公路 12 万 km,同比增长 27%,高速公路总里程也在稳步增长,如图 1-1 所示。2011 年是“十二五”的开局之年,根据交通运输部投资计划,全国公路建设投资将有望超过 7000 亿,未来的几十年内我国公路建设仍将保持一定的规模。高等级公路的建设对路基的要求很高,尤其是高速公路,建成以后必须达到“安全、平稳、高效、舒适”的要求。在公路施工过程中,影响高速公路建设质量的最重要的因素是路基沉降,因而必须在路基施工过程中严格控制施工质量。

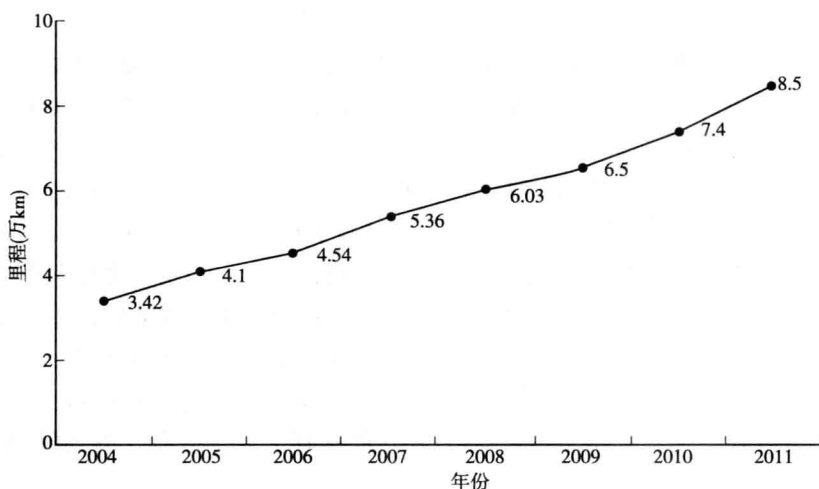


图 1-1 我国高速公路建设情况

我国地域辽阔,地质情况非常复杂,尤其是软土在我国广泛分布,如东南沿海地区海积相软土分布广泛,内陆地区则有较多的湖积、河积相软土分布。道路设计选线应该尽可能地避开软土地区,但有时由于客观因素,不得不将路线选定在软土路基地区。在软土地区修建公路,高填土路堤往往存在路基稳定性差或沉降变形过大等问题,而低路堤在交通荷载作用下,常使道路沉降变形,严重影响道路的质量和使用,由此造成的经济损失是巨大的。在软土路基上修筑公路将给工程建设带来较大的隐患和影响,是公路工程建设需要解决的关键问题之一。而且路基的沉降是一个长期的过程,路基土要达到完全固结往往需要几年甚至十几年的时间,也

就是说,在公路建成后,其路基土的沉降仍然在继续进行。路基的工后沉降过大往往导致公路路面结构的破坏,直接影响公路的使用品质和公路的寿命,给国民经济带来巨大损失。

路基的沉降与稳定问题是一个复杂的系统问题,是土力学的一个重要分支。目前已经形成了一门学科——变形沉降学,它是一门以建筑地基与基础的沉降变形特征为研究对象的科学。有学者将地基变形沉降问题看成是一个往复循环沉降作用系统圈,沉降作用系统圈如图 1-2 所示。

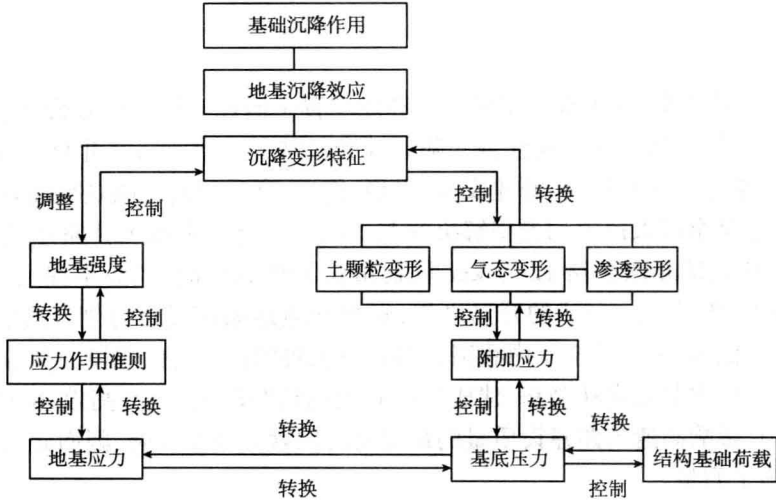


图 1-2 沉降作用效应系统圈

将地基沉降变形问题看成沉降作用转换系统圈,全面、系统、协调地认识和探索沉降特征,这无疑对解决路基沉降与稳定问题提供坚实的理论基础。然而理论分析计算并不能解决所有的路基沉降与稳定问题,即便是理论计算证明合理的设计方案,由于施工不当,仍然会导致路基失稳的病害的发生。因而路基施工时还必须进行信息化动态监测施工,即施工监测—信息反馈分析—施工纠正或设计变更的方法,在公路施工过程中对路基进行动态观测,合理安排路基各个结构面的施工进度并防止路基沉降过大导致路基失稳的发生。利用实测数据资料预测路基的工后沉降量,不仅是对理论分析计算的有效补充,也是保证路基施工质量与安全的有力措施。

对于路基的沉降与稳定观测,虽然在国内外有大量学者开展了相关研究,推出了很多路基沉降与稳定观测的方法,但仍缺乏系统性。为了推动路基的沉降与稳定观测工作,本书经过大量研究总结路基沉降与稳定观测的相关知识,并在此基础上进行提高升华,更好地为路基施工服务,以供读者学习使用。

## 1.2 公路路基沉降与稳定观测的意义

公路建设具有工期长、成本高的特点,往往需要投入大量人力、物力及财力,公路建成后出现病害需要投入很高的维修成本。美国公路协会(AASHTO)经过早期对路面结构破坏的大量调查研究发现 70% 以上的路面结构的破坏是由路基变形引起的。我国公路路基的主要病害也是路基沉降问题,特别是长期困扰我国建设者们的软土路基的下沉病害问题。在公路的建设期对路基沉降与稳定进行动态观测,实时把握路基沉降与稳定动态,具有重大的现实意义,否则,极易引起地质病害。例如,某高速公路路基施工在路基沉降观测不及时的情况下,加载

速度过快而导致路基失稳,如图 1-3 所示。

近几年调查发现,我国一些高速公路在运营的初期就发生了路面结构的破坏,因而路基的变形必须引起足够的关注。近年来,在全国各地的公路建设大批上马的同时,已建成的公路暴露出了许多的问题,例如:

(1)某公路桥的引桥桥台上出现两道裂缝。裂缝长 4m 多,宽约 1cm,可以塞进一个手指。桥东侧的挡墙也向外凸出,且人行道上还有多块石板松动。专家指出,出现这些情况的根本原因是引桥路基沉降,如图 1-4 所示。



图 1-3 某高速公路路基失稳



图 1-4 某公路桥引桥裂缝

(2)某公路路面出现下沉开裂现象,路面下沉裂缝的水泥块长度约 12m,如图 1-5 所示。本路段存在着极大安全隐患,过往机车司机表示,总是提心吊胆地靠向道路的东边走。分析人士指出,该路段裂缝是由于路基的不均匀沉降导致。

(3)某公路刚建好还未正式投入使用,整条道路却出现不同程度的裂缝,如图 1-6 所示。据施工人员反映,该地区水沟、河涌较多,施工时未做深层的软基处理。



图 1-5 某公路路面裂缝一



图 1-6 某公路路面裂缝二

(4)某公路大范围路面出现下沉,下沉区域长度约为 20m,雨雪天气路面出现积水,严重影响公路的使用,如图 1-7 所示。

公路路面的裂缝和下沉不仅导致了公路路面平整性差、影响了公路行车的安全及美观,而且会造成公路维修成本大幅增加、使得公路的寿命极大地缩短,给国民经济带来巨大损失。

出现这些问题的根本原因是公路路基施工过程控制不当和对路基的工后沉降量估计错误。在公路施工期间,施工人员若对路基沉降量进行科学、合理的观测并加以控制,可以有效地避免这些问题的出现,收集路基沉降的实时和准确的观测数据能够让施工人员准确地了解

路基沉降的变化信息,并及时调整公路地基各结构层的作业时间,或者在施工过程中采取有效、及时的措施,将有效避免较大路基沉降对公路建设产生的不利影响。同时,施工人员可以在观测数据的基础上,利用路基沉降理论结合成熟的预测模型对路基的工后沉降量做出准确的预测,并在路基施工中充分考虑这些沉降量,将有效地控制公路路基的工后沉降,保证公路的使用品质和增长公路的使用寿命。



图 1-7 某公路路面下沉

随着我国交通事业的发展和公路技术等级的提高,公路建设已进入以提高为主的新阶段,人们对公路运输的服务水平提出了更高的要求。为了使公路满足使用要求,公路建设者必须在精心设计的基础上,严格按照设计文件和现行施工技术规范的要求认真组织施工,抓好原材料质量控制、施工控制参数确定、现场施工过程质量控制和分项分部工程交竣工验收四个关键环节,确保公路工程质量。路基沉降与稳定的好坏直接影响到公路的使用性能,路基沉降与稳定监测工作是公路工程质量管理的

主要内容之一,是工程质量科学管理的重要手段。建立完善的工作制度和试验检测工作细则以及合理配置试验检测人员,是公路工程试验检测的重要保障。因此,在现场施工的质量控制中,配备与质量控制和管理相匹配的常规标准试验仪器以及采用适宜的检测方法,进行必要的地基沉降与稳定检测工作,是对工程质量检查、监督和控制的根本手段。

随着公路技术等级的提高,各级公路管理部门和施工单位已对加强质量检测与施工质量控制和验收工作予以了高度重视,有效地推动了公路路基沉降与稳定观测技术的发展。一方面,新的沉降变形监测仪器和方法的研究开发在不断深入,并得到了广泛的应用;另一方面,观测技术人员培养和培训工作不断加强,一个素质较高的专业化的试验检测队伍正在形成,路基沉降与稳定监测工作体系不断得到完善。

### 1.3 公路路基沉降与稳定观测的目的

为掌握路基在施工期的动态变形,施工期间必须进行稳定和沉降观测。一般来说,路基沉降与稳定观测主要有以下 4 个目的:第一,施工安全预报;第二,科学确定工程施工的时间;第三,验证设计假定及修正后期设计;第四,研究沉降变形预测理论。具体简述见下文。

#### 1.3.1 施工安全预报

由于公路路基施工自身的特点,容易受到地质灾害的影响。比如,路基上方有风化严重的岩层高陡边坡、深挖路堑边坡以及高填路基边坡,容易出现失稳灾害问题,可能造成严重的经济损失,甚至伤及人员;在路基加载过程中,由于沉降速度突变超过允许界限,也容易发生事故。从施工安全的角度出发,首先应当考虑施工期的施工人员、施工机械仪器和路基工程本身的安全问题。要做到这一点,除必须严格遵守一系列规章制度外,监测是保证施工安全必不可少的重要措施之一。因为路基边坡、路堑边坡的自然特性和力学特性都很复杂,很难仅靠理论计算来确定安全界限。

一般认为,通过对路堤、路基边坡及路堑边坡的动态监测所取得的数据进行理论分析和稳定判断的方法是可以达到防患于未然的目的。比如,在软土体中的一定深度进行孔隙水压力观测,确定地基土体中的水压力动态,了解路堤受压力的范围内的不同土层的固结度。通过沉降观测仪器(沉降、水平位移的观测)研究路基下卧层的不同位置的孔隙水压力,评估边坡的稳定性;通过观测数据可以预测将来可能发生的事故,从而提出施工过程中所需要的调整方式。另外,有关工程竣工后运营期的安全问题,也将依赖于监测得到保证。总之,监测是保证在有安全隐患的环境下,路基工程施工期和运营期安全的重要措施之一。

### 1.3.2 科学确定工程施工的时间

在路堤填筑施工时,为了达到压实效果需要分层填筑压实,合理控制每层填筑施工的时间间隔对路基的沉降与稳定具有重要意义。在各类施工规范中往往以沉降速率作为控制路基填筑频率的标准,动态的沉降观测是计算沉降速率的必要措施。另外,利用孔隙水压力计监测路基土的孔隙水压力从而计算路基土的固结度,对路基工程施工时间的控制进行有力的补充。

在公路路面工程施工之前,对路基沉降观测数据进行分析,通过沉降预测模型推算出最终的沉降量和工后沉降,合理确定路面工程施工的时间,为公路运营期的平整性、舒适性打下基础。科学、合理地预测工后沉降量是公路施工的重要环节,如果路面施工过早,路基的沉降没有完全稳定,过大的工后沉降可能会导致路面的起伏不平甚至产生裂缝,不仅影响路上行车速度,而且雨水沿着路面缝隙进入,侵蚀破坏路基会造成巨大安全隐患;如果路面工程施工太晚,则会造成工期延误,最终造成建设成本的增加。

### 1.3.3 验证及修正设计

路基工程的设计和施工方案是设计人员利用现场勘测资料对实体进行物理抽象,借鉴长期的实际工程经验并采用数学分析手段预测计算而制定出来的。设计方案在很大程度上会符合和反映真实的现场情况。然而,不同路段的地质条件与周围环境有差异,具体项目之间也千差万别,在设计计算中未考虑的各种负面因素,都可以通过对现场监测结果分析加以局部修改和完善。将施工监测和信息反馈看作设计的一部分,前期设计和后期设计互为补充。

路基高边坡和深挖路堑边坡是一个复杂的系统,不仅因其具有十分复杂的物质组成和结构,而且可能处于十分复杂的地应力环境和渗流场中,也由于受到复杂的人类活动的影响。因而精确地预测其变形破坏过程并进行准确的处理方案设计是十分困难的,必须对土体进行监测,利用监测数据对其目前所处的稳定状态作出评价,并对其发展趋势作出预测。如果监测数据能够证明土体某部位在现有的处理方案下仍可能失稳,则在其发生破坏之前及时进行补充设计处理,防患于未然;反之,监测数据表明土体稳定且安全系数过大,并经过理论论证,则可考虑削减原设计方案的支护强度,节约成本。

### 1.3.4 沉降变形预测

沉降的预测理论有很多,工程中常用的沉降预测方法有双曲线法、指数曲线法、泊松曲线、灰色预测等方法,也有些新的预测方法,如人工神经网络预测模型和遗传算法等。什么样的预测方法适用于何种路基沉降是需要深入研究的问题,而研究这些问题需要大量的、不同工程的路基沉降观测数据为基础,可以说沉降与稳定观测数据是制约沉降预测理论发展的瓶颈,利用实际路基工程的现场观测数据,探讨适用于不同路基的沉降变形预测方法,不断提高高等级公路路基沉降预测的精度,可以有效推动路基沉降预测方法的进步。

## 1.4 公路路基沉降与稳定观测的原则

路基施工与使用过程中应注意观测路基的固结、强度及位移等要素的变化,这不仅是发展路基沉降研究理论和评价处理效果的依据,同时也可以及时防止因设计和施工不完善而引起的意外工程事故。路基的沉降与稳定观测绝不是各种量测仪器的简单“堆积”,需要遵循一定的原则才能提高路基沉降与稳定观测的可靠性和有效性。作者根据实际工程经验总结出以下 8 条路基沉降与稳定观测的原则供读者参考。

(1) 监测点应设在容易反馈观测数据的部位。地基条件差、地形变化大以及设计问题多的部位和土质调查点附近均应设置观测点,桥头桥尾纵向坡脚、填挖交界的填方段、沿河等特殊路段均应酌情增设观测点。

(2) 经济合理原则。无论是在路堤的纵向位置还是横向位置,测点越多,测得的结果就越能反映路堤真实情况,但测点增多,费用、测试工作量、测点保护工作量都会随之增加,而且测点会给施工带来不便。因此,从满足监测需要与经济合理性考虑,高等级公路的一般路段沿纵向每隔 100 ~ 200m 设置 1 个观测断面,桥头路段应设置 2 ~ 3 个观测断面为宜。

(3) 多层次监测原则。可以理解成两层含义:第一,采用多种手段进行监测,以便监测数据之间相互校核和补充;第二,地表和地下相结合,组成立体监测系统。

(4) 避免施工干扰的设计原则。尽量避免或减少施工对监测的干扰。

(5) 设计和现场相结合的原则。测点的设置不仅要根据设计的要求,同时还应针对施工中掌握的地质、地形等情况增设。沿河、临河等填土量大且稳定性差的路段,必要时应该进行路基内部土体水平位移观测。对于成层软土路基需要同时进行土体内部竖向沉降观测和水平向位移观测。

## 1.5 公路路基沉降与稳定观测的主要内容

### 1.5.1 特殊路段路基沉降与稳定观测

公路路基沉降监测是在路基内埋设各种测试元件,通过测试元件获取路基各层的沉降变形数据及应力应变数据。沉降观测为沉降预测提供数据基础,沉降观测数据的准确性在很大程度上决定了沉降预测的精度和效果。

在对公路路基进行沉降与稳定观测时,观测断面的设置一般应根据公路沿线的地质特点,采取全线观测、重点突破的思想,并针对具体路基情况,选择有代表性、典型的断面来进行路基的沉降与稳定观测。在典型断面进行分层观测,用来了解和研究不同路基条件、不同填料的情况下,半填半挖、高填方路堤及陡坡路堤在施工期内随填土高度增加所引起路基沉降变形的基本规律,进而明确路基和路堤在上述条件下的不同土层沉降变形的内在机理。对不良路基段进行全面的动态沉降观测,以便随时了解施工过程中路基的沉降变化情况,一旦发现异常立即采取相应的措施。当路堤填至 95 区或 93 区后,需要对全线进行路堤总沉降观测,以便控制底基层和面层施工期的沉降变化速率,并对其工后沉降做出预测,从而避免高填土路堤、不良路基段、填挖交界段(或半填半挖段)、桥头台背段的沉降过大或者沉降差较大导致路面结构破坏或桥头跳车现象的发生。

#### 1. 软土路基段沉降与稳定观测

在公路建设过程中,软土地段是路基沉降与稳定问题最突出的地段。《公路路基设计规

范》(JTG D30—2004)中规定,在软土地基上修筑公路时,最突出的问题是稳定和沉降,高速公路、一级公路或二级公路设计车速高,路面平整性要求高,所以规定施工过程中必须进行沉降和稳定观测。进行施工期的孔隙水压、地下水位、地基及路堤的侧向位移及沉降观测,了解不同类型或不同处理方法软基的固结与沉降情况,以及施工过程对软基沉降的影响情况,同时研究高填方路堤下不同厚度软基的最合理处理方案。软土路基的监测项目及目的如下:

(1)地表水平位移量及隆起量:用于稳定管理;监测地表水平位移及隆起情况,以确保路堤施工的安全与稳定。

(2)地表沉降量:用于沉降管理;根据测定数据调整填土速率;预制沉降趋势;提供施工期间沉降土方量的计算依据。

(3)地下土体分层位移量:用于稳定性的管理与研究;用作掌握分层位移量,推定土体剪切破坏的位置。

(4)砂垫层及其周围地下水位:用于观测砂垫层及其周围地下水位的变化,判断排水固结的趋势,掌握土体的稳定性沉降。

(5)孔隙水压力:用于稳定性的管理与研究;反映路堤在土体固结、基础变形和水流渗透等因素作用下孔隙水压力的大小和变化。

## 2. 高填土路段路基沉降与稳定观测

观测膨胀岩土、填石路堤及高黏土等不良填土的高路堤,对其进行分层沉降观测及侧向位移观测。了解较差填料在不同压实度、不同填方高度、不同气候条件变化、不同填土含水率情况下的路堤分层变化规律。高填土路堤的观测项目及目的如下:

(1)路基基底及地表沉降量观测:用于沉降监测,预测工后沉降趋势,确定路面施工时间。

(2)地表水平位移及隆起量:用于稳定监控,确保路堤施工安全和稳定。

(3)侧向位移观测:用于稳定监控,控制填土速率,确保施工安全。

(4)孔隙水压及地下水位观测:用于稳定性的管理与研究,反映路堤在土体固结、基础变形和水流渗透等因素作用下孔隙水压力的大小和变化。

(5)全断面观测:用于稳定监控与研究,掌握路堤全断面的沉降情况。

(6)分层沉降观测:用于稳定监控与研究,掌握分层位移量,推定土体剪切破坏位置。必要时采用。

## 3. 陡坡路堤沉降与稳定观测

随着我国山区高速公路的大量建设,经常会遇到陡坡路堤,陡坡路堤也是比较常见的路基结构形式之一。陡坡路堤稳定性往往不好,路面常常产生纵向开裂病害,甚至产生路堤侧向滑塌灾害。为了保证陡坡路堤施工过程中的稳定性以及满足今后的使用要求,必须对陡坡路堤进行动态观测。

(1)地表沉降观测:观测地表位移、边坡位移及隆起、变形发展情况。

(2)地表水平位移及隆起量观测:观测地表水平位移情况,用于稳定监控,确保路堤施工安全和稳定。

(3)地表裂隙观测:观测裂缝及其发展情况。

(4)地下位移监测:探测相对于稳定地层的地下岩体位移,证实和确定正在发生位移的构造特征,确定潜在滑动面深度,判断主滑方向,定量分析评价边(滑)坡的稳定状况,评判边(滑)坡加固工程效果。

(5) 支挡结构变形、应力观测:如果坡脚设有支挡结构,支挡结构岩土体的变形观测,支挡结构与岩土体间接触压力观测。

4. 半填半挖路段路基的沉降与稳定观测

随着山区公路建设的增多,填挖交界结构因具有填挖量平衡、施工进度快、工程量小和工程投资少等优点而经常被采用。然而路堤填挖两侧的土体性质可能存在较大差异,填挖交接面本身为软弱结构面,如果处理措施不当常常降低路基强度和整体稳定性。半填半挖路基稳定性是填挖交接结构面性状、组合、力学强度及其他工程活动综合作用的结果,在填挖交接面上会出现诸如节理面、软弱夹层、风化接触带等劣势结构面,因此边坡破坏常发生在填挖交接面上。半填半挖路段路基的沉降与稳定观测主要内容及目的如下:

(1) 挖方区与填方区的地表沉降观测:用于差异沉降监测,确保路基施工安全。

(2) 地表水平位移观测:用于稳定监控,确保路堤施工安全和稳定。

(3) 地下土体分层位移量:用于稳定性的管理与研究;用于掌握分层位移量,推定土体剪切破坏的位置。

5. 过渡段沉降与稳定观测

路基过渡段一般包括路桥、路涵、路隧过渡段。通常沟壑地段需要设置桥涵,沟壑地段路基的含水率高、孔隙比大、压缩性大、强度低,在其上填筑路基一般会产生较大的变形;桥头、隧道口的路基的结构与一般路基的结构不同,往往沉降较小,过渡段往往比普通路基的沉降大而导致不均匀沉降,造成跳车现象;桥头路段比一般路段填筑高度要高5~10m,基底的附加应力大,也会引起路基的沉降问题。过渡段的沉降观测的主要内容应以不均匀沉降观测为主。

(1) 地表沉降观测:用于差异沉降监测,用于指导施工。

(2) 侧向位移观测:用于稳定监控,控制填土速率,确保施工安全。

1.5.2 路基边坡稳定观测

施工期的稳定观测是为了防止水平位移过大而引起土体的破坏与开裂。在实施过程中,主要以路堤范围外地基水平位移作为观测手段,采用埋设边桩的方式进行观测。定期在施工过程中予以观测,同时可以通过边桩观测地表沉降,从而反映土体是否有隆起现象。由于路基边坡或路堑边坡滑坡是工程中常遇见的问题,因此稳定观测另一个重要内容就是观测路基边坡或路堑边坡的稳定性问题。路基边坡及路堑边坡稳定性观测项目见表1-1。

路基边坡及路堑边坡稳定监测项目 表 1-1

| 监 测 内 容   |        | 监 测 目 的                                                                            |
|-----------|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 地表监测      | 水平位移监测 | 观测地表位移、变形发展情况                                                                      |
|           | 地表沉降监测 |                                                                                    |
|           | 裂缝监测   | 观测裂缝发展情况                                                                           |
| 地下位移监测    |        | 探测相对于稳定地层的地下岩体位移,证实和确定正在发生位移的构造特征,确定潜在滑动面深度,判断主滑动方向,定量分析评价边(滑)坡的稳定状况,评判边(滑)坡加固工程效果 |
| 地下水位监测    |        | 观测地下水位变化与降雨关系,评判边坡排水措施的有效性                                                         |
| 孔隙水       |        | 观测土体中孔隙水压力的变化,用于反映土体固结情况                                                           |
| 支挡结构变形、应力 |        | 支挡构造物岩土体的变形观测,支挡构造物与岩土体间接触压力观测                                                     |

## 1.6 路基沉降与稳定观测技术的发展状况

### 1.6.1 路基沉降与稳定理论研究现状

路基沉降理论研究的大体可分为两种类型:一类为理论公式推导法;另一类为数值分析研究法。

其中理论公式推导法是建立在经典土力学基础上,并引入了一些人为假定。这类方法体现出了简便、直观、计算参数个数少并易获得等优点,因而在工程上被广泛使用。比如,当地质条件良好并且是符合大面积堆载的条件时,太沙基一维固结理论的假定(路基土在外荷载作用下不会发生侧向变形)比较接近现实,因而计算误差也不会太大;如果用于属于二维固结平面应变问题的高填土软土路基变形计算,则会产生较大的误差,软土路基压缩层越深厚,路基强度越低,软土层的厚度与路基底部宽度比值越大,计算产生的误差也越大。

数值分析研究法是近代土力学的产物,20世纪70年代以来,随着计算机技术的发展和运用,人们结合有限元分析理论将复杂的路基土压缩计算问题编成可操作的计算机程序,利用计算机的计算解放了大量人工计算,得到了比较合理可靠的结果。

通过数值分析研究法,可以对地基土的非线性应力、应变的特性进行较为全面的分析,并兼顾考虑复杂的地质条件和边界因素,因而在理论分析上算比较严密。但是这种方法也存在着缺陷,简单来说就是参数确定的问题。数值分析研究法往往需要通过利用实验的方法来确定地基土的本构模型参数,然而实际情况通过实验很难模拟,而且土样在取样、搬运、储存、试验过程中受到扰动,使得土样与实际情况偏离,从而实验时会产生较大的误差。此外,通过有限元分析法虽然能够考虑到土的非线形应力、应变关系和复杂的地质条件,但是目前关于土本构关系的模型在精度和条件上的描述有限,尽管使用了很多参数,但结果并不令人满意。可见数值分析研究法使用过程不如理论公式推导法简单,结果也并不理想,因而其在工程中应用不多。

由于土体变形的复杂性,使得理论公式推导计算法、数值分析研究法在对应变的预测精度上也显得不足,特别是对修建在软基上的建筑物,预测的精度相差更大。由于理论公式推导法无法在短期内解决掉其缺陷,促使人们采用其他方法来预测地基沉降量。比较常见的有 Asaoka 法、对数曲线法、指数曲线法、双曲法、神经网络算法、遗传算法等。

在1955年,尼奇波·罗维奇根据一维固结理论推导出公式: $s_t = s_f[1 - \exp(-\beta t)]$ 。1959年曾国熙根据沙井地基的三向固结度以及沙井以下土层的单向固结度结合,同时考虑了因侧向变形而引起的沉降,导出公式  $s_t = (s_f - s_d)[1 - \alpha \exp(-\beta t)] + s_d$ ,并根据  $s-t$  曲线来推算地基沉降问题。《地基处理手册》、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)以及国内其他文献资料推荐采用指数曲线法。然而指数曲线法要求一年以上的恒载,而且最好选择曲线变缓段计算。由于最初一段曲线和实际相差比较大,因而最好在曲线靠后的区段来选择计算起始点,预测出来的最终沉降量才会与实际沉降值比较接近。因而指数曲线法比较适用于施工填土高度已经达到了设计高程,并可以获得施工期之后长时期的观测资料的路基沉降分析和预测。双曲线法仅局限于沉降基本趋于稳定的曲线后段点计算,在曲线前段应用便会出现较大误差。在一般双曲线基础上,修正双曲线法对时间起点选择及公式进行了相应的修正。1978年,

Asaoka 将 Mikasa 一维固结状态下用体积应变来表示的固结方程,用一个包含待定系数的级数形式的微分方程来表达,通过以往的沉降观测数据来求出这些未知的系数,然后利用这些系数来预测总沉降量,这便是 Asaoka 法,也常称为浅岗法。

德国生物学家 Verhulst(1837 年)提出了 Verhulst 模型,邓聚龙(1982 年)提出了灰色预测模型  $G(1,1)$ 。从此一些研究者在灰色理论的基础上对 Verhulst 模型在沉降推算方面做了研究。灰色 Verhulst 模型所模拟的沉降量与时间的关系曲线与实际变化规律相一致,都呈 S 形,能够反映全过程的沉降量与时间的关系,因此对于建筑物沉降等曲线近似 S 形的序列使用 Verhulst 模型效果较好。

W. S. McCulloch 和 W. Potts(1943 年)提出了神经网络 MP 模型,开创了用数理逻辑的方法研究生物神经网络的先河。攀琨(1998 年)基于人工神经网络方法,建立了非线性力学反分析模型,用位移反求岩土工程计算中的邓肯一张非线性应变模型(E-B 中的主要参数) $k, k_b, n, m, R_f$ ,然后对土石坝进行后期位移预测。

J. Holland(1967 年)首先提出了遗传算法,它是生命科学与工程科学相互渗透的结果。遗传算法作为软土地基沉降计算的全新算法,克服了传统算法的弊端。遗传算法的编码操作保证在每一步迭代时能充分利用群解中的信息,且具高效并行性。

### 1.6.2 路基沉降与稳定观测技术的现状

公路交通领域内的技术进步在近几十年呈飞跃式发展,尤其是尖端技术对公路行业的不断渗透,改变了人们多年的传统观念,有力地推动了路基沉降与稳定观测技术的发展。

目前,在公路较发达的国家和地区,如欧美和日本,公路工程路基沉降监测技术发展迅速,达到了一定的水平。在路基路面压实度、承载力、平整度、路基沉降与稳定观测以及路基沉降自动观测等方面研制出自动化监测设备,有的监测设备还具备较为完善的数据自动处理功能。相比之下,我国路基沉降与稳定观测技术起步较晚,虽然近年来发展较快,但总体水平还比较落后。我国从“七五”计划开始,已进行了一些路基沉降监测技术的研究和产品的研发,基本已涵盖了各种主要的监测技术,形成了一定的基础研究能力;特别是 20 世纪 80 年代中后期从国外引进的各种工程监测仪器设备,对先进的沉降监测技术已有了一定程度的了解,为公路路基监测新技术的研究开发与推广应用奠定了基础。有关研究部门经过十多年对进口设备技术的消化吸收,为交通运输部颁布施行的测试规程和检验评定标准中编制相关设备和参数的规定起到了极大的促进作用。一些有能力的科研开发机构借鉴国外先进的制造技术和使用经验,已生产出相同类型的国产设备,如测斜仪、分层沉降仪、位移计、孔压计等都有国产化产品,其性能和价格成本针对昂贵的进口仪器具有一定的优势。我国现行规范中已经引入了一些较为先进且成熟的检测技术,但在工程实际中,由于受各种条件限制,这些新技术的推广和应用并未普及。我国公路工程检测体系已经建立起来,试验监测人员的队伍在不断扩大,但相对高速发展的公路建设而言,还远远不能适应形势的需要,特别是检测人员仍然比较缺乏。一些新上岗的试验检测人员虽然经过了系统的培训,但缺乏实际工作经验,技术素质有待进一步提高。总体上看,我国在路基沉降与稳定观测技术方面相对落后。深入、系统地开展路基沉降检测技术研究,发展我国自主知识产权的路基沉降监测技术,提升我国路基监测技术的规范和行业标准,促进我国路基沉降监测技术的发展、应用及实施,对于全面提高我国公路的施工管理和养护水平,具有重要意义。

### 1.6.3 路基沉降与稳定观测技术发展的新方向

#### 1. 路基沉降与稳定观测的自动化发展

目前我国的路基沉降与稳定观测普遍停留在这样的水平:手工操作观测仪器、测量精度较低、自动化程度低、无法实时连续监测等。传统地面观测主要以经纬仪、全站仪、水准仪等大地测量技术为主,不易实现自动化,测量效率低。随着科学技术的发展,出现了越来越多自动化程度高的现代监测技术。以智能全站仪(测量机器人)为代表的现代地面沉降与稳定测量技术的出现,改变了传统全站仪、经纬仪人工观测技术的现状,实现了测量技术的自动化;以固定测斜仪、孔压计、应变计等为代表的地下监测技术也实现了自动化、数字化发展;无线通信、有线网络、卫星通信等现代通信技术的发展为路基沉降与稳定观测的自动化提供了基础。

##### (1) 测量机器人监测技术。

测量机器人是一种能够代替人进行自动目标搜索、识别、跟踪和照准目标的智能型全站仪。与传统的全站仪相比,测量机器人克服了需要人工照准目标的缺陷,内置于仪器内的 CCD 阵列传感器,可以识别测量棱镜返回的红外线,实现仪器的自动目标搜索及识别、跟踪和照准的功能。在相关软件的控制下,测量机器人能在无人控制的情况下自动完成多个目标的识别、照准与测量。由于 CCD 传感器识别的是红外线,在夜间、雾天甚至雨天也能进行测量,实现测量的自动化。

测量机器人监测系统按照监测方法可分为移动式周期监测和固定式持续监测两种方式。移动式基于常规的搬站方式,当观测周期开始测量时,安装观测系统,利用计算机或全站仪内置程序自动控制全站仪进行测量,该观测周期结束后拆除系统;固定式持续监测系统是将监测机器人长期安设在测站上,并在测站上建立监测房来保护全站仪,通过通信系统与控制计算机相连,实现无人看守、24 小时的连续监测、自动数据收集处理、自动报警、远程监控等功能。目前固定式持续监测系统有单台极坐标模式、多台空间前方交会模式、多台网络模式等。

①单台极坐标模式,配置简单,设备利用率较高,但是监测的范围比较小,适用于小区域(约  $1\text{km}^2$  内),无法组建局部观测网来测量,要达到亚毫米级精度必须采取合理的测量方案 and 数据处理方法。

②空间前方交会主要采用距离空间前方交会,以三边或多边交会法确定监测点的三维坐标。该模式利用高精度边长,获得亚毫米的点位精度。但系统配置过于庞大,成本较高。该模式设备利用率比较低,同时由于受交会几何图形结构的限制,不宜在较平坦的地面监测采用。

③多台网络模式是指将多台智能全站仪和多台计算机通过网络或者通信、供电电缆连接起来,组成监测网络系统。该模式可以通过组网来解算各测站点的坐标,然后对观测点的变形数据统一进行差分处理。该模式实现了控制网联量、变形点观测及数据处理的完全自动化,很适合较大区域的变形监测。

测量机器人监测技术也存在一定的不足之处,监测范围比较小,其自动识别距离最远为  $1\text{km}$  左右。

##### (2) 以固定式测斜计为传感器的自动测斜系统。

公路线路上的高填土路堤、陡坡路堤、地质不良地段路堑等都是施工要重点考虑的边坡容易失稳地段,传统的公路边坡监测方法使用全站仪监测边坡表层的位移和埋设测斜管观测土体内部的位移。这些传统方法的缺点在于自动化程度不高,观测人员必须到现场采集数据,尤