

“十二五”国家重点图书出版规划项目
交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护

Monitoring and Evaluating Techniques
of Highway Subgrade Safety in Operation Period

运营期路基 安全监测与评价技术



陈东丰 凌建明 郑纯宇 等著

左行车道 路中心 右行车道

2010-04-12 2010-05-10 2010-07-02 2010-09-15 2010-11-29 2011-02-17 2011-05-03



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护

运营期路基安全监测与评价技术

陈东丰 凌建明 郑纯宇 等 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书依托交通运输部交通建设科技项目“运营期路基安全监测与评价技术”课题成果编写而成,主要阐述运营期路基安全的定义、路基安全机理、路基安全监测、路基安全监测数据分析方法、路基安全评价指标与标准、路基安全评价预警及养护管理等相关技术,并结合安全监测实体工程介绍路基安全监测方案设计、传感器选型及远程传输调试等内容。

本书可供从事公路路基设计、特殊路基施工、运营监测以及养护管理工作的人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

运营期路基安全监测与评价技术 / 陈东丰等著. —
北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.8

(交通运输建设科技丛书.公路基础设施建设与养护)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-114-11470-0

I. ①运… II. ①陈… III. ①公路路基—路基工程—
安全监测②公路路基—路基工程—安全评价 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 124528 号

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·公路基础设施建设与养护

书 名:运营期路基安全监测与评价技术

著 者:陈东丰 凌建明 郑纯宇 等

责任编辑:曲乐 周宇

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:9.5

字 数:210千

版 次:2014年8月 第1版

印 次:2014年8月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11470-0

定 价:40.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

交通运输建设科技丛书编审委员会

主任：赵冲久

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委员：郑代珍 林 强 付光琼 赵之忠 石宝林 张劲泉
费维军 关昌余 张华庆 蒋树屏 沙爱民 郑健龙
唐伯明 孙立军 王 炜 张喜刚 吴 澎 韩 敏

总 序

近年来，交通运输行业认真贯彻落实党中央、国务院“稳增长、促改革、调结构、惠民生”的决策部署，重点改革力度加大，结构调整积极推进，交通运输科技攻关不断取得突破，促进了交通运输持续快速健康发展。目前，我国公路总里程、港口吞吐能力、全社会完成的公路客货运量、水路货运量和周转量等多项指标均居世界第一。交通运输事业的快速发展不仅在应对国际金融危机、保持经济平稳较快发展等方面发挥了重要作用，而且为改善民生、促进社会和谐作出了积极贡献。

长期以来，部党组始终把科技创新作为推进交通运输发展的重要动力，坚持科技工作面向需求，面向世界，面向未来，加大科技投入，强化科技管理，推进产学研相结合，开展重大科技研发和创新能力建设，取得了显著成效。通过广大科技工作者的不懈努力，在多年冻土、沙漠等特殊地质地区公路建设技术，特大跨径桥梁建设技术，特长隧道建设技术，深水航道整治技术和离岸深水筑港技术等方面取得重大突破和创新，获得了一系列具有国际领先水平的重大科技成果，显著提升了行业自主创新能力，有力支撑了重大工程建设，培养和造就了一批高素质的科技人才，为交通运输科学发展奠定了坚实基础。同时，部积极探索科技成果推广的新途径，通过实施科技示范工程，开展材料节约与循环利用专项行动计划，发布科技成果推广目录等多种方式，推动了科技成果更多更快地向现实生产力转化，营造了交通运输发展主动依靠科技创新，科技创新服务交通发展的良好氛围。

组织出版《交通运输建设科技丛书》，是深入实施创新驱动战略和科技强交战略，推进科技成果公开，加强科技成果推广应用的又一重要举措。该丛书分为公路基础设施建设与养护、水运基础设施建设与养护、安全与应急保障、运输服务和绿色交通等领域，将汇集交通运输建设科技项目研究形成的具有较高学术和应用价值的优秀专著。丛书的逐年出版和不断丰富，有助于集中展示和推广交通运输建设重大科技成果，传承科技创新文化，并促进高层次的技术交流、学术传播和专业人才培养。

今后一段时期是加快推进“四个交通”发展的关键时期，深入实施科技强交战略和创新驱动战略，是一项关系全局的基础性、引领性工程。希望广大交通运输科技工作者进一步解放思想、开拓创新，求真务实、奋发进取，以科技创新的新成效推动交通运输科学发展，为加快实现交通运输现代化而努力奋斗！

王君顺

2014年7月28日

前 言

公路路基是指按照路线位置和一定技术要求修筑的带状构造物，是路面的基础，承受由路面传来的行车荷载。“安全”的路基应能在不同的气候环境、水文地质条件影响和交通荷载作用下，保持长期稳定性，使路面具有良好的使用功能。然而，伴随着高速公路建设逐渐向地形地质条件复杂、气候条件恶劣的地区不断延伸，受线形指标的制约，高填深挖、地质不良及低填浅挖路段十分普遍，加之不利气候条件和重载交通的影响，公路病害问题，尤其是路基塌陷、边坡滑移、冻胀融沉、差异变形及强度过度衰减等路基工程病害问题日益凸显。

运营期公路路基结构失稳不但会造成交通中断，使公路养护管理部门增加养护成本，给养护工作加大难度，更重要的是造成人员伤亡和严重的经济损失。因此，大力发展运营期路基监测和养护技术，实时把握运营期公路路基的安全性态，掌握路基是否存在安全隐患及产生的规模有多大，什么时候可能会发生，以及针对可能发生的安全问题采取何种应对或加固措施等，变被动养护为主动维护，就成为人们最为关心，也是亟待解决的问题。

路基安全监测属于土木工程结构安全监测的范畴，结构安全监测技术最早应用于水电工程领域，然后在桥梁、边坡、地下结构等工程中相继开展。目前，公路路基安全监测只在施工期进行，运营期的路基安全监测及相关的研究基本没有开展。首先，在路基安全监测手段方面，除部分大型边坡工程开始采用自动监测技术和系统外，大多路基工程仍采用常规的人工监测手段，自动化程度不高，难以实现连续监测和实时预报，且测试进度受人为因素影响较大；其次，在路基安全监测数据分析方面，美国、前苏联、日本等国家以及国内铁路部门对于路基变形的预测和计算虽然已经拥有了各种理论和方法，但是它们在实际工程的应用中存存在种种局限，因此需要讨论具体条件下方法的适用性，并加以改进，以提高预测精度；在路基安全评价指标和方法方面，路基安全状态的判定要能反映路基失稳破坏的临界指标，其中变形指标是对路基稳定状态的最直观反映，也是各因素对路基共同作用的综合体现，但由于路基受到土体内岩性、结构面特性以及环境特性的复杂影响，导致尚没有被普遍接受或认可的准则和方法；再有，在路基安

全养护管理系统方面，伴随着公路建设的发展，国内外在公路养护技术和手段方面进步迅速，尤其是在路面、桥梁养护方面，研发出了适用于不同场合和工程需求的养护管理系统，相对而言，路基安全养护在技术和手段方面较为滞后，也没有相应的路基养护管理系统提供支撑。

从目前公路的实际运营状况来看，运营期路基由于发生过量不协调变形所导致的工程病害问题相当突出，对行车安全性和舒适性造成了巨大威胁，因此，开展运营期的路基安全监测就成为公路工程的一个迫切需求。

本书以交通运输部西部交通建设科技项目“运营期路基安全监测与评价技术”为依托，围绕运营期路基安全的内涵要求，进行了大量的调查、室内外试验及理论分析工作，获得了多项具有创新性的研究成果，达到了国际先进、部分国际领先水平，为运营期路基安全监测与评价提供了技术依据。项目研究中，在对运营期路基安全病害调研、分类的基础上，以路基安全机理分析为依据，建立了基于路基整体稳定和路面使用性能的路基安全监测技术与预警体系，以及典型工况条件下路基结构安全评价的指标与标准。项目组还自主研发了具有实时监测和无线传输功能的公路路基开裂位移采集装置，提出了路基开裂位移的采集方法，并经过在敦化草炭土监测路段长达4年的使用，证明该专利技术实用可靠。综合项目研究成果，开发了具备路基监测数据分析与预测、安全隐患判别、安全评价与预警、养护决策等功能的路基结构安全监测与养护管理系统。项目取得的研究成果已经用于鹤大公路草炭土不良地基路基稳定的长期性和连续性安全监测，为制订适宜的养护维修决策提供了科学依据；还用于长春至松原高速公路辅道低填路基在水、温、荷载共同作用下的安全性态及其变化规律持续监测，为研究季冻区低土方路堤在冻融及荷载作用下安全性态变化机理和制订行业技术标准提供了数据支持。

参加项目研究和本书撰写工作的人员有吉林省交通科学研究所暨季节性冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室（长春）的陈东丰、郑纯宇、王书娟、秦卫军、陈志国、李冬雪，同济大学的凌建明、陈楠、钱劲松，重庆交通大学的陈葱琳。本书由陈东丰、凌建明、郑纯宇统稿。在编写过程中还参考了国内外专家与学者的理论、研究成果及资料，在此一并表示诚挚的感谢！

本书适合公路设计、施工、养护及管理人员在具体工作中使用，也可作为相关专业研究生、本科生的教学参考书。

由于运营期路基安全监测与评价技术刚刚取得了阶段性成果，随着研究的不断开展，有很多问题还需要时间的检验和进一步完善，加之时间和水平有限，不足之处在所难免，欢迎广大读者不吝赐教。

作者

2014年2月

目 录

第 1 章 概述	001
1.1 研究背景和意义	001
1.2 国内外研究现状及存在的问题	001
1.3 主要研究内容和目标	004
第 2 章 运营期路基安全特征及机理	006
2.1 运营期路基安全病害特征及原因	006
2.2 路基安全病害的分类	018
2.3 路基安全机理	022
第 3 章 运营期路基安全监测	040
3.1 运营期路基不同病害安全监测项目和基本要求	040
3.2 监测对象和工程条件	041
3.3 运营期路基监测方案	042
3.4 监测数据自动化采集及智能化远程传输技术	052
3.5 运营期路基安全监测案例	060
第 4 章 路基安全监测数据分析方法	075
4.1 监测数据预处理	075
4.2 高路堤边坡位移分析方法	080
4.3 软基路堤沉降预测方法	084
第 5 章 路基安全评价指标与标准	103
5.1 基于整体稳定性要求的路基安全评价	103
5.2 基于路面使用性能要求的路基安全评价	107
5.3 季冻区路基冻胀安全评价	115
第 6 章 路基安全评价预警及养护管理	118
6.1 路基安全预警	118
6.2 路基安全综合预警与养护决策	121
6.3 路基病害养护对策	121
6.4 不同路基病害养护对策的适用性分析	131
6.5 路基安全养护管理系统	132
参考文献	136
索引	140

第 1 章 概 述

1.1 研究背景和意义

近年来,我国公路建设取得了巨大的成就,公路建设向地形地质地貌条件复杂、气候条件恶劣的地区不断延伸,公路网的覆盖率不断提高,有效提升了公路的通达水平,有力保障了社会经济建设的快速健康发展。伴随着高速公路的快速发展,运营期道路的安全问题日益引起专家学者的广泛关注和高度重视。

路基是指按照路线位置和一定技术要求修筑的带状构造物,是路面的基础,承受由路面传来的行车荷载。对于路基而言,自公路正式通车开始,至大、中修或改扩建工程实施前,路基结构产生典型病害情况是运营期路基安全与否的显性表现。路基病害产生的原因复杂,与工程设计、施工以及运营期的养护管理整个过程密切相关。路基病害一方面会对公路造成破坏,严重威胁驾乘人员的生命安全;另一方面,路基病害会造成路面结构性能的损害,影响行车舒适性,增加养护维修成本。可见,解决公路路基病害问题是关系到我国高速公路事业健康发展的重大问题。

另外,许多典型路基病害事例表明,运营期公路路基结构失稳不但会造成交通中断,给公路养护管理部门增加养护成本,加大养护难度,更重要的是造成人员伤亡和严重的经济损失。因此,如何实时把握运营期公路路基的安全性态,掌握路基是否存在安全隐患及产生的规模有多大,什么时候可能会发生,以及针对可能发生的安全问题采取何种应对或加固措施等,变被动养护为主动维护,就成为业内人士最为关心,也是亟待解决的问题。

1.2 国内外研究现状及存在的问题

1.2.1 国内外研究现状

(1) 路基安全监测

路基安全监测属于土木工程结构安全监测的范畴,结构安全监测技术最早应用于水电工程领域,然后在桥梁、边坡、地下结构等工程中相继开展。目前,路基安全监测只在施工期进行,运营期路基安全监测及相关的研究基本没有开展。但是,从公路的实际运营状况来看,运营期路基由于发生过量不协调变形所导致的工程病害问题相当突出,对行车安全性和舒适性造成了巨大威胁,因此,开展运营期的路基安全监测就成为公路工程的一个迫切需求。结构安全监测技术的核心内容通常有以下5个方面:安全监测的对象和目的、安全监测开展的工程条件、安全监测实施方案、监测数据分析方法、安全评价及预警方法。



(2) 监测数据分析

很多岩土结构安全监测主要是通过对结构物各关键点位的变形监测来实现的,根据变形监测数据判定结构安全稳定状态,需要相应的理论基础和恰当的分析方法。通过总结美国、前苏联、日本等国家在监测数据分析方法领域所取得的成果表明,最常用的分析方法大致分为模型分析、反演分析以及安全综合评判分析等。

① 监测数据的模型分析。

目前,普遍的做法是应用数理统计的方法对现有监测数据进行回归分析,是依据建立模型的趋势外延,因此不能考虑突发因素的影响。在 20 世纪 80 年代,国内一些学者和教授采用模型拟合的位移—时间曲线,提出了边坡失稳前总变形量和位移速率的综合预报方法、灰色系统拟合外推模型、滤波灰色分析方法、泊松旋回模型、黄金分割法,以及二次曲线回归拟合和灰色理论中生物繁衍的动态模型预测方法。此外,还有学者尝试了马尔科夫预报、模糊数学方法预报和图解法等多种方法,使滑坡预报的方法向定量化迈进了一大步。但是,这一期间存在的问题主要表现在:对观测数据的分析、处理,预报时序资料的选择,干扰信息的剔除与有用信息的增补等还认识不足,也没能综合考虑变形破坏与预报参数和稳定机制相联系,建立的模型大都是事后验证模型,并且由于变形失稳病害条件的多变性、复杂性,影响了通用效果和预报的精度。

② 基于监测的反演分析。

反演分析(反分析)就是以现场量测到的反映系统力学行为的某些物理信息量(如位移、应变、应力或荷载等)为基础,通过反演模型(系统的物理性质模型及其数学模型,如应力与应变关系式等)推算得到该系统的各项或某些初始参数,最终建立一个更接近现场量测结果的理论预测模型,以便正确反映或预测结构或岩体的某些力学行为,及时反馈到设计、施工和管理中。

根据反分析时所利用的基础信息的不同,反分析法大体上分为应力反分析、位移反分析和混合反分析。目前,国内外研究表明应用反分析思想,通过位移信息,反演滑体的形态、滑面的位置、滑面的力学强度等是可行的。但是考虑监测数据的局限性,以及材料的非均匀性、非线性、断裂损伤的复杂性等,使得一般意义的反分析结果误差较大,所以有必要通过实体工程,在占有大量持续监测信息的基础上拓展延伸此方法,尤其是针对运营期路基的结构特性、工作特性以及损害机理等进一步发展反分析的思想 and 原理,评价和分析路基的安全储备。

(3) 安全评价及预警方法

岩土结构的安全评价及预警必须基于监测指标类别、监测数据分析和处理方法以及安全监测目的。对于路基安全评价及预警而言,如何基于变形监测数据提出评价路基安全的指标和标准是关键。

路基的工作性能受工程地质、水文、气候等条件影响较大,同时与地基状况、路基填料、降水、荷载等密切相关,因为这些内在和外在因素的综合作用将会促使路基的工作性能发生不同程度的变化,所以需要建立适宜的评价指标体系和方法反映路基工作性能的状况。但是,关于路基工作性能状况的判定,还需要反映路基失稳破坏的临界指标,如应力指标和变形指标等,其中变形指标是对路基稳定状态的最直观反映,也是各因素对路基共同作用的综合体现。目前,由于变形指标(位移)包括变形量、变形方向以及变形的时间和空间变化可以通过监测直接

获得,所以被广泛应用,但路基土体内岩性、结构面特性以及环境特性的复杂影响,导致尚没有形成被普遍接受或认可的准则和方法。因此,国内外的一些学者在努力探索极限变形指标的试验标定、采用测斜仪和变形计测得变形速率指标的界定,以及采用监测获得的位移时间蠕变曲线确定的变形速率角指标来推算路基结构的变形稳定性态。

关于路基的安全性评价,国内外学者进行了大量探索,包括采用系统工程、人工智能、灰色理论、突变理论以及模糊数学等一些先进实用的方法,综合考虑路基结构工程、地基工程、环境因素等,通过建立多层次、多目标的决策体系,进行综合评判,找出荷载集与效应集、效应集与控制集之间的确定性与非确定性之间的关系,再借鉴专家经验进行综合分析和推理,以判定结构体的稳定状态。这些方法具有一定的参考价值。

(4) 养护管理系统

科学的路基结构安全监测与养护管理是实现“寓建于管”、“建管并重”思想的重要技术保障。目前,由于现行规范没有明确路基结构安全的评价标准和养护标准,使养护决策依据模糊,养护方案选择只能根据管理者的养护经验确定,因此国内外已有的各种公路管理系统,均没有将路基结构安全监测、评价和养护管理纳入系统,无法运用现有的公路管理系统对路基结构进行安全监测、评价及养护,所以有必要研究开发一套专门用于路基结构安全监测与养护管理系统,实现公路基础设施运营养护的现代化管理。

1.2.2 存在的问题

根据国内外研究现状,提出运营期路基安全监测与评价技术方法体系需要解决以下几个方面的问题。

(1) 运营期路基安全的定义

运营期路基安全的定义直接影响到项目研究的范围、深度和广度。范围过大,易与路基边坡安全交叠,抓不住重点;范围太小,无法合理判别运营期路基安全问题。运营期路基安全是指在不同气候环境、水文地质条件影响和交通荷载作用下路基结构不出现塌陷、边坡滑移、冻胀融沉、差异变形及强度过度衰减等病害,也是衡量路基安全的标准与外在表现。如何更深刻地体现其本质尚未见到有关报导,但这是开展运营期路基安全研究应首先解决的问题。

(2) 运营期路基安全监测的具体对象

在运营期,不可能对每个路段都进行安全监测,需进行筛选和确定。因此,监测工作开展之前必须要对全线进行周密调研,确定哪些路段已经发生了安全病害,哪些路段存在发生安全病害的隐患。实际上,很多存在安全病害隐患的路段在施工期就已经进行过监测,如果能将施工期监测和运营期监测相衔接,一方面可以获取反映路基全过程安全性态的监测信息,另一方面也节省了人力物力,减少了对运营期公路的人为破坏和干扰。

(3) 运营期路基安全监测的内容

运营期监测的开展方式不可以照搬施工期监测的模式。这是因为运营期监测与施工期监测存在明显差异,这种差异突出体现在两个方面:一是现场监测的手段,二是数据采集的方式。

施工期路面没有铺筑,现场监测手段主要是在路基各关键点位埋设监测元件,以获取反映路基性能的各项参数。实践证明,这种监测手段稳定、可靠,也可以在运营期监测中采用。然



而,公路投入运营之后,路面已经铺筑,车辆开始通行,在路基中埋设过多的监测元件势必会对路面结构造成损坏,也不利于公路的畅通运营。为了解决这一问题,将探讨在运营期监测工程中引入路基无损检测技术。

施工期监测主要采用人工采集数据的方式,这种方式并不适用于运营期。病害路段通常在公路全线呈点状分布,相距较远且大多地处荒郊野外,派工作人员频繁去往现场进行数据采集是不现实的。为了解决这一问题,项目组集成研究了适用于运营期的监测数据自动采集和远程传输的方法。

(4)分析模型和方法

路基监测数据有其自身的特点,只有采用适宜的分析模型和方法才能够认识路基安全病害的成因机理,掌握路基结构目前的安全状态及发展趋势。根据研究现状可知,路基变形监测数据的预测主要有建模计算方法和根据实测数据拟合预测方法。路基安全监测可以在运营期连续不断地获得反映变形变化趋势的监测序列,适合采用实测数据回归预估的方法对路基变形进行快速分析和预测。目前,能够用于路基变形回归预测的模型有很多,但是并不存在一种方法或者模型能够在任何条件下都适用,因此,有必要研究和提出适用于运营期路基变形监测数据分析预测的较佳模型。

(5)路基安全评价指标及标准

监测的最终目的是为了对路基安全进行评判,在适宜的时机对可能发生的破坏现象进行预警并进行处理,这也是整个研究的落脚点。所以,开展研究必须根据路基安全病害的破坏机理和模式,结合运营期监测的参量,提出合适的安全评价指标,并且根据破坏的临界状态制订安全评判标准。提出合理的评价指标和标准是实现路基安全评价及预警的关键。

(6)运营期路基安全养护管理系统

依托计算机工作站、网络技术开发系统程序是公路运营管理发展的必然趋势,运营期路基安全监测与评价技术研究应符合这一发展规律,从而实现现代化、标准化及智能化,尽早地应用于工程实践,发挥作用。

综上所述,本书将吸收相关领域安全监测的先进技术,同时也将充分借鉴路基工程近年来所取得的丰富成果,提出一套适用于运营期的路基安全监测与评价技术体系。

1.3 主要研究内容和目标

1.3.1 主要研究内容

本书针对我国公路建设的发展趋势和技术需求,在借鉴国内外相关研究成果的基础上,结合公路路基结构变形失稳病害隐患具体情况,对运营期路基安全监测技术、数据分析方法、路基安全评价标准及路基安全的预警与养护对策进行深入研究。主要研究内容如下。

(1)运营期路基安全特征及机理

根据不同类型路基安全问题的特征和表现形式,提出运营期的路基安全是指路基结构在运营过程中所发生的变形不超过安全的临界状态,并将其归纳为三种类型,即路堤失稳安全病

害、软基路堤工后不均匀沉降安全病害、季冻区低填浅挖路基冻胀融沉安全病害。路基安全机理是确定监测方案和评价方法的基础,不同条件下路基结构发生的安全病害类型不同、成因机理也各有差异。在已有研究成果基础上,归纳整理各种典型路基安全病害的成因及发展规律,为安全监测方案的制订及安全评价指标标准的确定提供理论依据。

(2) 路基安全监测方案及监测系统的集成

在路基安全机理分析的基础上,针对不同条件下路基安全病害提出了运营期的监测方案(包括监测项目、测点布设位置、监测周期、监测手段等)。通过调研已有监测、检测及传输技术,并充分考虑埋设监测元件对既有工程的影响及人工数据采集的弊端,建立了基于电感式原理、具有实时监测和无线传输功能的公路路基开裂位移采集装置。根据运营期路基安全监测的要求,提出了监测与检测、运营期监测与施工期监测相结合的思想,并以试验路段为例介绍了监测系统的集成过程。

(3) 路基安全监测数据预处理及分析方法

路基监测数据不可避免地存在误差,依据路基等岩土体在环境和荷载作用下的变形特点,提出了监测数据预处理的原则和粗略的判别和处理方法,并以某监测工程为例,采用莱茵达法和未确知有理数滤波法进行了应用和验证。针对典型路基工况和安全病害类型,在数理统计回归分析法、灰色理论方法等岩土安全监测数据分析方法的对比分析后,根据路基安全评价的要求及监测信息的类型,提出了与其相适应的分析模型与方法,并采用工程实例进行验证,效果良好。

(4) 路基安全评价指标与标准

路基安全监测项目较多,但路基变形是最直接的体现。以满足路基结构稳定性要求和路面结构使用性能要求为依据,在两者破坏模式分析的基础上,比选各种变形指标,从路基安全监测和数据分析技术、行业规范要求以及工程经验及普遍认可的做法等多方面依据出发,制订了一套针对典型路基工况和不同安全问题类型的结构安全评价指标和标准体系,作为路基安全评价和预警的基础和关键。

(5) 路基安全预警及养护对策

根据路基安全监测数据,及时反映路基现状和发展趋势并采取一定措施防止不利事件发生是路基安全监测的最终目标,依据路基安全评价标准将路基分成了不同的安全状态,划分了预警等级。在当前路基典型养护对策归纳分析的基础上,提出运营期路基安全养护的原则,并结合运营期路基处治典型案例,提出运营期路基安全养护对策。

1.3.2 总体目标

针对运营期路基安全监测的特点和基本任务要求,以典型路基工况和安全病害类型为对象,通过路基安全病害调研与机理分析,遴选合理的现场监测项目,并集成研发监测系统,确定安全评价的指标、标准和基于变形理论的路基失稳预测方法,开发基于安全监测的路基结构养护管理系统,为运营期路基安全监测和养护决策提供技术依据、硬件支持和软件手段,提高和保障安全监测的有效性、数据分析的合理性以及信息反馈的时效性。



第 2 章 运营期路基安全特征及机理

道路工程对路基的基本要求包括三个方面：一是整体稳定，二是变形小，三是良好的耐久性。运营期的路基一旦发生整体失稳，或者过量的变形，尤其是不协调变形，就会直接导致路基路面结构体系的破坏，威胁行车安全，严重影响道路的正常使用。

一般而言，土木工程的结构安全是指结构不产生整体或局部失稳，或者过量变形而影响正常使用和运营安全的状态。因此，路基安全的内涵涉及两个方面：一是路基整体稳定安全，二是保证路面正常使用的路基变形安全。虽然路基稳定是一个强度概念，但仍与路基变形密切相关，所以，路基安全的本质是不过量的路基变形。因此，运营期路基安全是指路基结构在运营期所发生的变形，不致造成路基整体失稳或严重影响路面正常使用状态。

2.1 运营期路基安全病害特征及原因

运营期发生的影响道路行车安全的路基、路面病害的表现形式多样，成因机理也各不相同，不同区域有不同的特点，以下分西南地区、西北地区以及东北地区进行介绍。

2.1.1 西南地区典型路基安全病害

(1) SW1 号高速公路

SW1 号高速公路全长 652km，路线大部分穿越山岭重丘地区，修筑了较多的高填方路堤，并且这些路堤多处于山间沟谷和斜坡地带，所在区域多年平均降雨量达 2 205mm，日最大降雨量可超过 400mm，路基的沉降和稳定安全病害问题备受关注。

该高速公路竣工验收后的第 4 年，有关部门对其中一些典型高路堤进行了较为细致的安全病害调查，并且对病害路段开展了有针对性的路基沉降监测工作，获得了大量的路基工后沉降监测数据。12 个典型高路堤位置及填方高度见表 2.1。根据断面形式，将这些高路堤分为四类(图 2.1)：一般高路堤(表中序号 2、4、5、9、10、12)、斜坡路堤(表中序号 1、8、11)、长条形半填半挖路堤(表中序号 3、7)、挡墙式半挖半填路堤(表中序号 6)。

典型高路堤一览表

表 2.1

序 号	统一里程桩号	原施工桩号	填方高度(m)
1	K727+800~K727+950	K5+300~K5+450	26.50
2	K667+300	K66+200~K66+475	31.49
3	K412+090~K412+250	K247+900	14.00

续上表

序号	统一里程桩号	原施工桩号	填方高度(m)
4	K419+500	K239+606	18.13
5	K424+500~K424+700	K234+506	16.00
6	K430+900	K227+920	36.00
7	K432+600	K226+220	35.00
8	K447+200	K211+583	36.10
9	K447+800	K210+080	26.41
10	K448+950	K209+915	20.43
11	K465+720	K193+120~K193+460	28.77
12	K467+550	K191+325	26.00

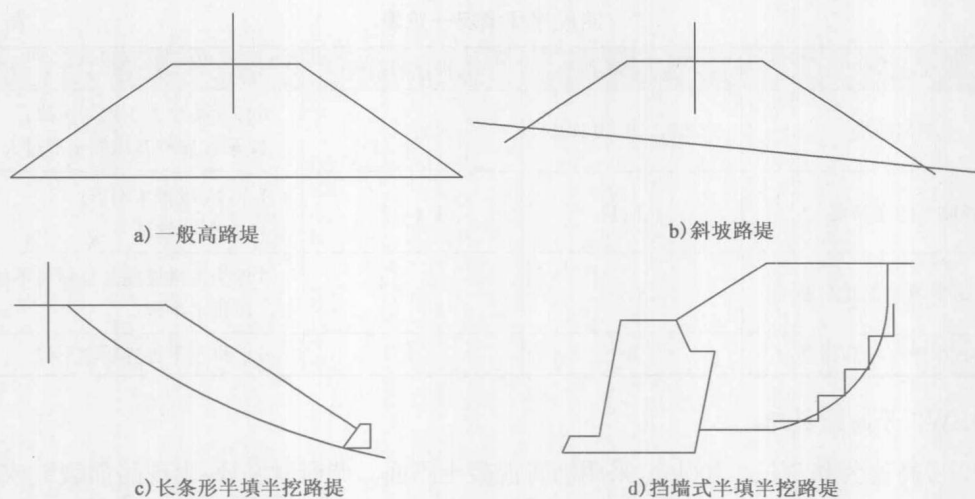


图 2.1 1号高速公路的典型路堤结构形式

高路堤路基大部分填料为含砾低液限土、低液限黏土、黏土质砂等,其工程物理性质见表 2.2。其特点为天然含水率低,易压实,强度高。

路基填料工程性质

表 2.2

含砾量 (%)	最大干密度 (g/cm ³)	最佳含水率 (%)	液限 (%)	塑性指数	CBR (%)	膨胀量 (%)
20~70	1.8~2.15	7~15	25~40	11~20	8~40	1~4.4

填料的工程性质较差的路段为:K727+800~K727+950段、K412+090~K412+250段,部分使用了高液限黏土和含砾高液限黏土,其液限达 56.2%,CBR 为 3.2%,膨胀量达 6.2%;K432+600 在上部几米填方施工中使用了隧道弃渣,多为硅质灰岩、炭质泥岩夹黏土,土质潮湿、杂乱,不易压实;K465+720 和 K467+550 部分使用高液限黏土、炭质泥页岩填筑,是填料质量最差的路段。炭质泥页岩的 CBR 值、密度均较大,但一旦遇水就会泥化,并且其固结