



山区高速公路 病害成因及处治技术

SHANQU GAOSU GONGLU
BINGHAI CHENGYIN JI CHUZHJ JISHU

朱红兴 魏家旭 刘昆珏 杨斌 ● 著



西南交通大学出版社



山区高速公路 病害成因及处治技术

朱红兴 魏家旭 刘昆珏 杨斌◎著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

山区高速公路病害成因及处治技术 / 朱红兴等著.

—成都: 西南交通大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5643-5789-4

I. ①山… II. ①朱… III. ①山区道路—高速公路—病害—防治 IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 229672 号

山区高速公路病害成因及处治技术

朱红兴 魏家旭
刘昆珏 杨 斌 著

责任编辑	柳堰龙
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	14.25
字 数	246 千
版 次	2017 年 9 月第 1 版
印 次	2017 年 9 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5789-4
定 价	78.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

《山区高速公路病害成因及处治技术》

编 委 会

主 任 陈文山

副主任 刘国强 李振雄 沈家文 王应祥 朱红兴

编 委 魏家旭 刘昆珏 杨 斌 李家舜 王明聪

李宏杰 白晓波 杨 林 徐宇光 徐云顺

陈伟强 王剑非 洪 洁 李晶蕊 袁淑文

闭春华 普利坚 李德宏 马正林 李正强

胡 俊 马兴伟 杨竹胜 罗顺江 刘睿迪

余化彪 王 进 吕维超 朱兴锐 张明杰

李官勇 李灿德 王东生 曾德林 连国彪

杨 亮 尹 斌 王 伟 胡朝赟 王新泽

宋之恒 胡建国 孙 雷 杨 勇 周 游

周成嵩 张 斐 皮忠普 唐敏玲

序

我国现代高速公路建设起步较晚，1988 年才开始第一条高速公路的建设，然而随着近年来我国高速公路建设的迅猛发展，至 2014 年底我国高速公路建成通车里程达到 11 万千米，跃居世界第一。云南省从 1994 年 9 月开工建设第一条高速公路——昆明至嵩明高速公路，截至 2017 年 5 月，云南高速公路通车里程 4 134 千米，实现了高速公路从无到有、从单条通车到初步成网的巨大跨越。

随着高速公路通车里程的不断增加，高速公路的工程病害问题逐步引起人们的重视。由于多方面的原因，我国已通车或在建的高速公路均或多或少存在着工程病害；而到目前为止，对于高速公路工程病害的处理方法并不多，多数是沿袭低等级公路的养护经验和养护方法，这些方法无法满足高速公路的要求。因此，如何安全、经济、快速地处理好高速公路的工程病害是当前迫切需要解决的问题。从云南省高速公路路网迅速扩张的现状分析，今后省内高速公路运营期的工程病害整治任务将越来越繁重。

云南省建设投资控股集团有限公司具有多年的高速公路建造经验，近年来集团在高速公路领域的业务逐步从传统的施工承包向投融资、运营管理等全过程全生命周期的业务延伸，集团发展迫切需要对高速公路病害整治、养护管理等方面的经验进行总结和提高。因此，通过石林至锁龙寺等高速公路病害整治经验的积累，总结分析高速公路病害成因，研究寻求不同工程病害的最佳整治方案，对于提升高速公路的建造水平和运营维护能力，进而提高高速公路的社会效益和经济效益均具有重要的指导意义。

为此目的，集团委托所属路桥总承包部，组织具备丰富经验的总工程师、专业技术人员，以石锁高速病害整治为背景，撰写《山区高速公路病害成因及处治技术》一书。这是集团广大科技干部认真贯彻习近平总书记关于科技进步和科技创新重要思想，深入研究高速公路病害整治为重点，以任务带科研的成绩。现在，此书正式交付出版，一是学习，二是交流，营造出浓厚学术氛围，激发广大工程技术人员立足于集团发展的具体实践，从任务中形成课题，从课题中形成成果，用高速公路建设的云南经验丰富我国工程技术界成果的宝库。

当前，云南省正在加快推进“五网”建设，集团正处在集中全力冲刺世界500强企业的关键时期，希望本套书的出版，对云南省高速公路建设，对建投集团的发展起到促进作用。

陈文山

云南省建设投资控股集团有限公司 董事长

2017年7月

前 言

本书由云南省建设投资控股集团有限公司路桥总承包部组织编写，路桥总承包部是云南建投集团下属专业从事公路施工总承包的事业部。近年来，随着集团向高速公路投融资、运营管理等全过程业务进行延伸，路桥总承包部逐步开展了一些高速公路工后病害处治的施工任务，积累了一些高速公路病害处治及养护管理方面的经验。本书的撰写正是基于石林至锁龙寺等高速公路病害整治工作的总结与提炼，希望这些工作能够引发业内专家对高速公路病害处治工作更多的关注和研究，发挥抛砖引玉的作用。

本书在编写过程中得到了集团公司领导的支持和指导，全书由陈文山、刘国强、李振雄、王明聪、王成、沈家文等主审。本书的撰写分工如下：

第1、2章主要由朱红兴撰写，李家舜、杨林、徐宇光、徐云顺、陈伟强、王剑非、马兴伟等参加了撰写和审稿工作。

第3章主要由魏家旭撰写，洪洁、李晶蕊、苏雄斌、闭春华、普利坚、杨竹胜、马正林、胡俊、罗顺江、张明杰、孙雷等参加了撰写和审稿工作。

第4章主要由刘昆珏撰写，白晓波、马正林、刘睿迪、余化彪、王进、王伟、吕维超、朱兴锐、李官勇、李灿德、宋之恒、胡建国、皮忠普、唐敏玲等参加了撰写和审稿工作。

第5章主要由杨斌撰写，李德宏、李宏杰、尹斌、王东生、曾德林、连国彪、杨亮、杨勇、胡朝赟、王新泽、周成嵩、周游、张斐等参加了撰写和审稿工作。

此外，在本书撰写过程中，云南省建设投资控股集团有限公司总承包部的多位工作人员也为本书的编写做出过贡献。

由于作者水平所限，书中观点难免存在一些局限性，不当之处恳请读者和专家批评指正。

作 者

2017年7月

目录

第1章 绪论	001
1.1 高速公路病害处治的背景	001
1.2 石林至锁龙寺高速公路工程概况	002
1.3 工程实施情况简介	004
第2章 山区高速公路路基病害成因及处治技术	005
2.1 路基病害的类型及特点	005
2.2 路基病害产生的原因	006
2.3 常见的路基病害处治技术	013
2.4 石龙高速公路路基沉陷病害处治技术	016
2.5 石龙高速公路边坡病害处治技术	036
第3章 山区高速公路沥青路面病害成因及处治技术	042
3.1 沥青路面病害的类型及特点	042
3.2 主要沥青路面病害的成因分析	044
3.3 主要沥青路面病害处治技术	050
3.4 石龙高速公路沥青路面病害处治技术	073
第4章 山区高速公路混凝土桥梁病害成因及处治技术	103
4.1 混凝土桥梁病害的分类及特征	103
4.2 高速公路混凝土桥梁病害产生的原因分析	111

4.3	高速公路桥梁病害常用加固方法·····	121
4.4	石龙高速公路桥梁病害检测·····	128
4.5	石龙高速公路桥梁病害评估·····	146
4.6	石龙高速公路桥梁病害处治施工工艺·····	169
4.7	石龙高速公路桥梁病害处治施工过程·····	177
第 5 章	山区高速公路隧道病害成因及处治技术·····	181
5.1	常见的隧道病害类型及特点·····	181
5.2	隧道水害的成因及处治技术·····	184
5.3	隧道衬砌裂损病害的成因及处治技术·····	189
5.4	石龙高速公路隧道病害的类型及处治效果·····	192
	参考文献·····	207

第1章 绪论

1.1 高速公路病害处治的背景

近年来,随着国民经济的快速增长,我国的交通运输事业,特别是高等级公路建设取得了突飞猛进的发展,其中高速公路建设正处在空前的高速增长时期。1988年10月,沪嘉高速公路的建成通车,标志着我国大陆高速公路建设实现了零的突破;1990年9月,全长375千米、在我国高速公路建设史上具有重要意义 的沈大高速公路建成通车,标志着我国公路建设进入了发展高等级公路的新时代。1999年我国高速公路总里程突破1万千米,2003年年底超过2.9万千米,位居世界第二,2014年年底超过11万千米,位居世界第一。而到了2016年底,全国高速公路总里程已经突破13万千米。高速公路的建设和使用,为汽车快速、高效、安全、舒适地运行提供了良好的条件,标志着我国的公路运输事业和科学技术水平进入了一个崭新的时代。云南从1994年9月开工建设第一条高速公路——昆明至嵩明高速公路,至今,已经走过了23年的艰辛历程。截至2017年5月,云南高速公路通车里程达4134千米,实现了高速公路从无到有、从单条通车到初步成网的巨大跨越,按计划到2020年,云南高速公路通车里程将达到8000千米。

我国从20世纪80年代开始修建高速公路,国家在高速公路的投资越来越大,公路工程的质量也越来越受到重视。90年代进入第一个建设高峰期;随着PPP融资模式的推广,目前高速公路建设又开始进入第二个高峰期。随着高速公路通车里程的不断增加,高速公路的工后病害问题逐步引起人们的重视。国内修建高速公路起步较晚,修建高速公路的水平、经验有限,在修建和设计时难免存在不足,在已通车的或正在建设中的高速公路上,由于各种因素的影响,大多数或多或少都存在着病害,它直接影响着高速公路的质量或正常运营,有

些严重病害,直接威胁着高速公路运行车辆的安全,造成一些不必要的损失,同时也给日常养护、维修工作带来许多麻烦。到目前为止,对于高速公路路面、路基、通道、桥梁等病害的处理方法并不多,多数是沿袭低等级公路的养护经验、设备、方法,这些无法满足高速公路的要求,因而,怎样快速、安全、经济,且不影响正常运行的处理病害的科学方法和研究是高速公路建设、管理、养护的难题,也是亟待解决的问题。在全国范围内各省、自治区的高速公路不同程度地均存在着不同类型的病害,其类型大体分为路面开裂、下沉、脱空、错台、路基的下沉、变形及通道、桥头的沉降等。这些病害如不及时处理就会进一步恶化,并形成恶性循环。例如某已建成通车的高速公路路面裂缝、沉陷极为严重,最大沉陷量达十几厘米;甚至部分混凝土路面多处开裂、沉陷,局部路面脱宽。其他路段也存在类似病害。有关部门曾采用传统的开挖换料回填方法处理后再重新铺筑路面,或采用即沉即铺法等处理,由于没有从根本上彻底消除隐患,其效果不甚明显,处理后病害继续发展、恶化。

从云南省高速公路网现状分析,今后高速公路大修期的病害整治任务将非常繁重。高速公路的病害整治和新建不同,具有特殊性;目前高速公路病害整治方面还缺乏成熟的经验。因此,借石林至锁龙寺高速公路病害整治的机会,总结分析高速公路病害成因,研究不同病害的整治方案,经过实践检验,总结和积累经验,跟踪方案效果,寻找适用的最佳方案,对高速公路的运营维护具有指导意义,经济效益也非常可观。由于路基、路面、桥梁、隧道在病害特点、形成机理、设计理论、维修方案等方面都不相同,因此本研究将从这四个部分分别展开论述。

1.2 石林至锁龙寺高速公路工程概况

石林至锁龙寺高速公路位于云南省昆明市石林县、红河州弥勒县境内,北接已建成的昆明—石林高速公路和已开工建设的国道 324 线陆良(西桥)—石林一级公路,南接正规划建设的国道主干线 GZ40 锁龙寺—蒙自高速公路和已开工建设的蒙自—河口高速公路、国道主干线 GZ75 平远街—锁龙寺高速公路,

是国家高速公路网规划的“7918”网中广州至昆明高速公路中的一段，为云南与广西、广东、港澳地区交通联系的公路主通道，也是亚洲公路网 A14 越南河内至中国昆明至缅甸曼德勒的组成部分。

路线主线设计全长 105.184 km，新哨连接线 8.869 km，弥勒连接线 4.114 km，主线为山岭重丘区双向四车道高速公路，计算行车速度为 100 km/h，路基宽 26 m，新哨连接线为山岭重丘区二级公路，弥勒连接线为山岭重丘区一级公路。

根据 2012 年 7 月云南石龙高速公路建设指挥部文件《关于调整石龙高速公路路面设计的函》，为确保 2012 年 10 月通车，云南石龙高速公路建设指挥部决定路基段路面施工中下面层，桥梁段桥面施工中上面层，在此背景下，石龙高速于 2012 年 10 月通车。

2012 年 9 月 29 日，石龙高速实现试运行通车；但是，石龙高速的建设并没有完全结束，还剩下沥青上面层单幅长 184.3 km 的铺筑、弥勒北连接线和石林连接线的续建、长湖和弥勒北收费站、蓑衣山和竹园停车区的建设等；加之路基路面和桥梁出现了不同程度的病害，路基路面沉陷、开裂、桥头跳车等。

2015 年 3 月 8 日，在省有关领导主持下，召开石龙高速公路建设遗留问题处理专题会议，明确由云南建工集团有限公司（后改名为云南省建设投资控股集团有限公司）负责石龙高速公路遗留工程建设。根据 2015 年 3 月 21 日云南省人民政府办公厅文件《云南省人民政府专题会议纪要》（第 18 期）要求，由云南建工集团有限公司负责石龙高速公路遗留工程建设。该项目采用施工总承包模式，总承包方为云南建工集团有限公司，工程范围涵盖：新哨弥勒两段连接线及 G326 连接线以上范围内的路基路面、桥梁涵洞、隧道、绿化、收费系统、监控系统、安全设施及病害处治等工程（主要包括勘察、设计、施工、设备采购及协调管理等）。

4 月 22 日云南建工集团与云南省公路局签订了施工总承包合同，集团领导非常重视后续工程的建设，4 月 23 日组建了“云南建工集团有限公司石龙项目指挥部”，工程计划工期 6 个月，原计划 2015 年 5 月 1 日开工，2015 年 11 月 30 日完工，如图 1-1 所示。

实际工期 6 个月，5 月 21 日正式开工，至 2015 年 12 月 15 日工程全面完工。

图 1-1 石龙高速公路总进度计划

004

第2章 山区高速公路路基病害成因及处治技术

2.1 路基病害的类型及特点

在运营公路项目中,公路路基病害主要有路基沉陷开裂、崩塌、滑坡、泥石流、砂土液化等,而在已经建成的山区高速公路中,最常见的路基病害包括路基沉陷开裂、滑坡、崩塌三种类型。

2.1.1 路基沉陷开裂

路基是路面结构的最下层,承受着由面层传下来的车辆荷载和上部荷载的自重。在实际工程中,无论是水泥混凝土路面还是沥青混凝土路面出现的损坏现象,大部分都是由于路基强度不足,稳定性变差,在外荷载作用下产生的过量变形所致。路基变形包括塑性变形和弹性变形两部分,过大的塑性变形将导致各种沥青路面结构产生车辙和路面不平整;对于水泥混凝土路面,路基的塑性变形将使板块特别是板边和板角产生局部脱空而引起断裂,弹性变形过大将使得沥青面层或水泥混凝土板产生疲劳开裂,并且在路面结构的总变形中,路基的变形占绝大部分。因此,在路面结构设计中,路基回弹模量的合理取值至关重要,若路基回弹模量值取的过低,计算出的路面厚度将会过厚,而实际路基回弹模量在要求的压实度条件下往往超过设计值,自然会造成资金的浪费;若路基参数取值过大,施工中路基回弹模量往往达不到要求,又会引起路面的过早损坏。所以,在路面结构设计中应该合理确定路基回弹模量值,由于路基回弹模量是一个关于土的类型、含水量、压实度以及测定方法的复杂函数,在工程实践中,应该综合考虑各方面的因素,正确处理其内在的联系,推荐能正确反映路基强度的模量值。

2.1.2 滑 坡

开挖路堑边坡滑坡灾害是高等级公路建设中病害的主要形式。在开挖路堑边坡病害中以滑坡灾害最为突出。

滑坡是指斜坡上的土体或者岩体,受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人工切坡等因素影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面或者软弱带,整体地或者分散地顺坡向下滑动的自然现象。产生滑坡的基本条件是斜坡体前有滑动空间,两侧有切割面。例如中国西南地区,特别是西南丘陵山区,最基本的地形地貌特征就是山体众多,山势陡峻,土壤结构疏松,易积水,沟谷河流遍布于山体之中,与之相互切割,因而形成众多的具有足够滑动空间的斜坡体和切割面。广泛存在滑坡发生的基本条件,滑坡灾害相当频繁。根据滑坡形成的机理及坡体结构形式,滑坡可以分成顺层滑坡、切层滑坡、覆盖土层滑坡等几种形式。

2.1.3 崩塌

崩塌(崩落、垮塌或塌方)是较陡斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚(或沟谷)的地质现象。

崩塌是指陡峻山坡上岩块、土体在重力作用下,发生突然的急剧的倾落运动,多发生在大于 60° 的斜坡上。崩塌的物质,称为崩塌体。崩塌体为土质者,称为土崩;崩塌体为岩质者,称为岩崩;大规模的岩崩,称为山崩。崩塌可以发生在任何地带,山崩限于高山峡谷区内。崩塌体与坡体的分离界面称为崩塌面,崩塌面往往就是倾角很大的界面,如节理、片理、劈理、层面、破碎带等。崩塌体的运动方式为倾倒、崩落。崩塌体碎块在运动过程中滚动或跳跃,最后在坡脚处形成堆积地貌——崩塌倒石锥。崩塌倒石锥结构松散、杂乱、无层理、多孔隙;崩塌所产生的气浪作用使细小颗粒的运动距离更远一些,因而在水平方向上有一定的分选性。

2.2 路基病害产生的原因

2.2.1 路基沉陷开裂病害成因分析

1. 土的变形性质

1) 土体的压缩性

地基和其上部填筑成的路基均由土体构成,地基和路基竖直方向变形即为

沉降。而土体的沉降同土的压缩性能密切相关。土体的压缩性决定了路基稳定性，土的压缩性即土的变形性质，是土的工程性质中最重要的组成部分之一，与高填路基的稳定和正常使用关系密切。

土是一种三相体，由固相、液相和气相组成。简单地说，是由土颗粒和孔隙中的水及气体组成。它们受力后的变形，实际上包括了土颗粒压缩，土孔隙中的水和气体的排除，土体积减小的过程。在外荷载作用下土的变形分为以下几种情况土颗粒及结构集粒的相互滑动或被压碎土孔隙中的水及空气被挤出土颗粒接触点处的水膜变形封闭气体的压缩和溶解土颗粒及水的压缩。

工程实践证明，在一般建筑物荷重作用下，土粒和水的压缩量极小，不及土体压缩量的 $1/400$ ，通常可认为是不可压缩的，气体的压缩性较强，在密闭的体系中，土的压缩是气体压缩的结果，但压力消散后，土的体积基本恢复，即土呈弹性变形。自然界的土处于开启系统，孔隙中的水和气体在压力作用下不可能被压缩而是被挤出。因此，土的压缩变形主要是由于孔隙中的水分和气体被挤出，土粒相互移动靠拢，孔隙体积减小而引起的。这种压缩变形的过程与水和气体的排出速度有关，开始时变形速度较大，然后随着颗粒之间接触点的增加，变形逐渐减弱。

2) 土的压实性

在工程建设中，如山区高速公路修建中高填路基，为了改善这些土的工程性质，需要通过压实使土变得密实。这一过程是土颗粒重新排列压实变密，外部的夯压功能使土在短时间内得到新的结构强度，包括增强粗粒土之间的摩擦和咬合，以及增加细粒土之间的分子引力以改善土的性质。

20 世纪 70 年代开始，经过学者们不断研究和探索，基本上认为土的压实特性同土的组成与结构、土粒的表面现象、毛细管压力、孔隙水和孔隙气压力等均有关系。压实的作用是使土块变形和结构调整以致密实。在松散湿土的含水量处于偏干状态时，由于粒间引力使土保持着比较疏松的状态或凝聚结构，土中孔隙大都互相连通，水少而气多，在一定的外部压实功能作用下，虽然土孔隙中气体易被排出，密度可以增大，但由于水膜润滑作用不明显以及外部功能也不足以克服粒间引力，土粒相对移动不显著，压实效果就比较差含水量逐渐加大时，水膜变厚、土块变软，引力也减弱，施以外部压实功能则土粒移动而挤密，压实效果渐佳在最佳含水量附近时，最有利于土粒受击实时发生移动使土变密，能被击实至最大容重。

2. 路基病害产生的机理

高速公路填土路基产生不均匀沉降是路基病害形成的直接原因,路基不均匀沉降会进一步导致路面裂缝的发生并产生波浪式的起伏。路基的不均匀沉降主要是由两方面的原因所致:(1)地基变形。当下伏地基为软土时,由于软土地基会产生持续的固结变形,因此会导致工后沉降的产生,从而导致路基的不均匀沉降和裂缝的产生。(2)路基在填筑过程中由于施工工艺控制不严,使得路基的压实度不够,也会导致路基本身产生工后不均匀沉降和路基开裂。

高填路基差异沉降由施工期沉降和工后沉降组成。施工期沉降是从路基开工到路基填筑完成时,其间产生的沉降,是伴随着路基填筑施工的一个持续过程。工后沉降是从路基填筑结束后,一个较长的时内,受土体自重、上部路面施工和行车荷载的影响,产生的沉降过程。引起高填路基差异沉降变形的因素很多,结合石龙高速公路的情况,路基的不均匀沉降可能出现以下几种情况:

1) 由于自重引起的天然地基的沉降

天然地基的固结在自身的重力作用下已基本完成,但在其上修筑路堤时,由于路堤填土成为附加荷载,从而使天然地基产生沉降变形。这种沉降变形的大小受路基填土的土质和填土高度的影响。高填方路基在石龙高速公路中大量存在,5 m 以上高填方路段约占全线的比例较高,由于附加荷载而产生的天然地基沉降应该引起重视。

2) 路基压实度不足引起的路基沉降

路基填土的材质、含水率、填筑厚度、压实工艺等因素都会影响路基填土的压实度,当施工工艺控制不当就很容易导致路基填土的压实度不够。当路基填筑完成后,未压实的路基填土在路面行车等竖向荷载的作用下会继续产生压缩变形,因此导致路基沉降、不均匀沉降乃至路基裂缝的产生。

在路基压实度不能满足要求的情况下,由于路基两侧压实度相对较低,因此路基沉降将使临近边坡的路基两侧高于路基中心,这一倾向在雨水入渗与冲刷的情况下表现得更加明显。在此情况下,硬路肩与行车道间将出现沉降差,并出现沉陷和错台现象。由于行车道板下脱空,雨水又能从错缝中渗入基层,在行车道频繁行车荷载作用下,加上雨水对面层和基层连接面的不断冲刷,容易导致路面的断裂。

3) 软弱土基引起的差异沉降

在未填筑路基之前,地基处于平衡状态。填筑路基之后,地基在上部荷载的作用下产生固结变形,直到达到新的平衡状态为止。当下伏地基为软土时,