



# 山区高速公路

关键工点施工控制及  
安全预警技术研究

杨志华 段 军◎ 著



西南交通大学出版社

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

山区高速公路关键工点施工控制及安全预警技术研究 /  
杨志华, 段军著. —成都: 西南交通大学出版社,  
2020.8  
ISBN 978-7-5643-7458-7

I. ①山… II. ①杨… ②段… III. ①山区道路 - 高  
速公路 - 道路施工 - 质量管理 - 云南②山区道路 - 高速公  
路 - 道路施工 - 安全管理 - 云南 IV. ①U415.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 096022 号

---

Shanqu Gaozu Gonglu Guanjian Gongdian Shigong Kongzhi ji Anquan Yujing Jishu Yanjiu  
山区高速公路关键工点施工控制及安全预警技术研究  
杨志华 段 军 著

---

责任编辑	杨 勇
封面设计	GT 工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市金牛区二环路北一段 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	<a href="http://www.xnjdcbs.com">http://www.xnjdcbs.com</a>
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	24
字 数	357 千
版 次	2020 年 8 月第 1 版
印 次	2020 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-7458-7
定 价	98.00 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

## 参编人员 >>>>

王 宾 代绍海 杨希文 王忠伟 念培红

王甲贤 熊 勇 方义明 闻乃军 张家颖

刘 波 张良翰 周轶峰 段 瑜 贾述顶

余平军 牟春海 李晓龙 赵宝才 马鑫云

黄灿荣 何汝苗 涂 雄 邱挎琼 杨锐槐

金 飞



# 前言



近年来，我国高速公路建设发展迅速，高速公路是国民经济与人们生活的重要基础设施，其建设对促进国民经济发展、交通便利化、物流、资源开发和投资吸引力具有重大的影响和积极作用。随着我国高速公路里程的不断增加，山区公路建设已成为我国公路建设的主战场。

云南省属于典型的高原多山地貌，修筑山区高速公路不可避免地进行深挖高填与隧道施工，由此形成路堑、路堤边坡以及隧道边仰坡，这些填挖施工破坏岩土体原有的平衡，因此在施工过程中极易诱发坍塌、滑坡等工程事故；在运营阶段受降雨、地下水、外部荷载等自然因素的影响也容易导致边坡垮塌等地质灾害的发生，对公路交通基础设施危害极大。岩土体的失稳破坏，都是从渐变到突变的发展过程。应用适当的监测手段，掌握其变形运动特征及相关影响指标的定量演化过程，捕捉工程事故与灾害前兆特征信息，就能有根据地判断工程事故与灾害险情的发生，做到提前预防，合理决策。因此，运用光纤光栅技术，研究高速公路隧道洞口段、顺层边坡段、高填方路段施工阶段的实时监控预警技术，能够为保证这些关键工程的施工质量和施工安全提供技术支撑；同时进一步开发运营阶


段的山区高速公路远程实时监控预警技术,为高速公路运营期的灾害预警及防治提供支撑。

保施高速公路投资开发有限公司基于保(山)施(甸)高速公路的施工安全管控实践与科学研究,组织编写了《山区高速公路关键工点施工控制及安全预警技术研究》一书。全书的编写紧扣山区高速公路工程施工安全管控的关键技术问题展开,具有很强的实用性,对于提高山区高速公路施工安全管控技术水平具有较强的应用价值和现实指导意义。

著 者

2020年3月

# 目 录



## 第 1 章

### 山区高速公路的特点 ..... 001

- 1.1 山区的工程地质特征 ..... 001
- 1.2 山区高速公路施工安全生产的特点 ..... 006
- 1.3 山区高速公路关键施工点 ..... 010

## 第 2 章

### 保施高速公路施工概述 ..... 013

- 2.1 工程简介 ..... 013
- 2.2 工程概况 ..... 022
- 2.3 初步设计批复意见执行情况 ..... 023
- 2.4 工程与水文地质条件 ..... 028
- 2.5 沿线筑路材料、水、电等建设条件及其与  
公路建设的关系 ..... 038
- 2.6 生态环境状况 ..... 040

## 第 3 章

### 高填方路基的特点及处治措施 ..... 042

- 3.1 高填方路堤的定义与断面形式 ..... 042

3.2	高填方路基的特点	043
3.3	高填方路基的常见病害及沉降机理	052
3.4	高填方路堤软弱土的处治措施	059
3.5	填料碾压夯实	065

## 第 4 章

	高填方路基边坡稳定性分析	069
4.1	研究背景、意义、现状与方法	069
4.2	有限元强度折减法的原理、优点与 超高边坡失稳的判据	076
4.3	填方路基边坡荷载	080
4.4	斜坡地基上填方路堤破坏机理分析	084

## 第 5 章

	高填方路基施工关键技术	093
5.1	填料的压实机理	093
5.2	路基填料	095
5.3	填筑质量控制指标体系	105
5.4	路基施工要点与施工质量控制	111

## 第 6 章

	高填方地基变形监测与预测	122
6.1	高填方变形监测技术	122
6.2	监测原理	126
6.3	人工神经网络模型	132

## 第 7 章

	顺层边坡稳定性分析及加固技术	136
7.1	顺层岩质边坡结构特征及破坏模式	136

7.2	顺层边坡预加固方法研究	153
7.3	顺层边坡加固设计方案优化	160
7.4	路基边坡防护技术及其适应性分析	177

## 第 8 章

	顺层边坡变形失稳机制	192
8.1	边坡结构	192
8.2	稳定性影响因素	194
8.3	顺层边坡失稳模式	199
8.4	边坡稳定判据与分析方法	207
8.5	岩土体物理力学参数	215

## 第 9 章

	顺层边坡信息化施工	221
9.1	概 述	221
9.2	信息化施工的工作程序	225
9.3	监测工程的实施	236
9.4	高边坡信息化施工	245

## 第 10 章

	顺层边坡监测技术	247
10.1	概 述	247
10.2	顺层边坡位移监测	248
10.3	地下水监测	260
10.4	结构物监测	263
10.5	边坡安全监测预警	267

## 第 11 章

	隧道洞口段的特点和作用	272
11.1	隧道洞口段的特点	272

11.2	隧道洞口段位置的选择	273
11.3	隧道洞口段的支护技术	275
11.4	隧道洞口段的开挖技术	281
11.5	边仰坡开挖支护技术	283
11.6	明洞施工关键技术	294
11.7	明洞及缓冲结构	303

## 第 12 章

	隧道洞口段的施工关键技术	310
12.1	隧道洞口段施工原则与方法	310
12.2	隧道进洞方式及洞门边仰坡类型	314
12.3	隧道洞门施工	320
12.4	隧道进洞施工关键技术	322

## 第 13 章

	隧道洞口段的施工监测技术	335
13.1	监控量测目的、原则、要求与方案	335
13.2	隧道洞口段监控量测数据分析	339
13.3	拱顶下沉数据分析	347
13.4	周边收敛数据分析	352
13.5	监测预警	357
	参考文献	365

## 1.1 山区的工程地质特征

山区地质病害致灾因素可归纳为特殊类土、地质作用、灾害地质、人类活动四个方面。特殊类土是指对公路工程产生危害、具有特殊岩土体结构和工程地质特性等的公路地质体。地质作用为易形成公路地质病害的岩溶、断裂构造、不稳定斜坡等地质环境条件或工程地质条件的活动性构造、岩溶岩蚀作用等地质作用产物、特殊地质构造、地质体结构。灾害地质为公路建设已经面临需处置的既存的或即将构成公路地质病害的现状滑坡、崩塌、泥石流等地质隐患。人类活动为公路路线通过或直接展布于其上的人类工程活动形成的采空区、不稳定边坡等。

### 1.1.1 山区病害致灾因素鉴别

山区病害致灾因素的正确鉴别是防治地质灾害诱发的基础。山区地质病害致灾因素的识别，需正确把握致灾因素划分标志（表 1-1）。

表 1-1 山区地质病害致灾因素识别标志简表

类 型		属 性	判别标志	成 因
特殊类土	软土	在静水或缓慢流水环境中沉积而成的、天然含水量大、压缩性高、承载力低、透水性差的一种软塑到流塑状态的饱和黏性土层	一般具有触变性、流变性、高压缩性、低强度、低透水性和不均匀性。另外，软土还具有一定的结构性	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 滨海沉积</li> <li>2. 湖泊沉积</li> <li>3. 河滩沉积</li> <li>4. 谷地沉积</li> <li>5. 泥炭沼泽</li> </ol>

续表

类 型	属 性	判 别 标 志	成 因	
特殊类土	膨胀土	<p>土中黏土矿物成分主要由亲水性矿物组成为主,同时具有吸水显著膨胀软化和失水收缩硬裂两种变形特性,且具有湿胀干缩往复变形的高塑性黏性土</p>	<p>1.现场判别(土颗粒细腻、常出现浅层滑坡和地裂、周围构筑物开裂、地形平缓无明显陡坎等);</p> <p>2.指标判别按土体与水相互作用所呈现的水理性质指标(塑性指数、液限、自由膨胀率、膨胀力等)等进行判别</p>	<p>1. 湖相沉积</p> <p>2. 冲积</p> <p>3. 残积、坡积</p> <p>4. 洪积</p> <p>5. 冰水沉积</p>
	红层软岩	<p>“红层软岩”泛指形成于侏罗系、白垩系泥岩、砂岩、砾岩、粉砂岩、砂岩、砾岩等软硬相间的层状岩体,外观上以红色、棕红色、砖红色为显著特征,为内陆碎屑沉积建造,碎屑物质成分变化大,以泥质胶结为主,也有钙质及铁质胶结,系软质岩石</p>	<p>根据其矿物成分和化学成分组成规律进行判别</p>	<p>形成于侏罗系、白垩系与第三系的泥岩、砂岩、砾岩、粉砂岩、砂岩、砾岩等软硬相间的层状岩体</p>
地质作用	岩溶	<p>在石灰岩等可溶性岩石分布地区,岩石长时间受到水的化学溶蚀和机械作用,形成溶洞、溶沟、裂隙、暗河、石芽、石笋、石钟乳等地面及地下的奇特景观,这种由于水对可溶性岩作用的演变,以及由此产生的特殊地貌形态和水文地质现象</p>	<p>石牙、石笋、漏斗、溶蚀洼地、坡立谷、溶蚀平原、落水洞、竖井、溶洞、暗河、天生桥、土洞、地下湖等</p>	<p>可溶性岩层由于流水的长期化学作用和机械作用</p>
	断裂构造	<p>岩体受构造应力作用发生变形,当变形达到一定程度后,使岩体的连续性和完整性遭到破坏,产生各种大小不一的断裂,称为断裂构造。包括断层和裂隙</p>	<p>破碎带标志、断层面标志、构造标志、地层岩相标志、地貌水文标志和线状排列的侵入体硅化、矿化现象</p>	<p>构造应力作用。裂隙和断层(活断层)</p>

续表

类 型	属 性	判别标志	成 因	
灾害地质	不稳定斜坡	自然横坡在 $15^{\circ}$ 左右、工程地质和水文地质环境较差,有潜在移可能,在受荷载下易引发地质和工程病害的自然边坡	坡体上方长期有水的影响(泉眼、水田、水库等),土体长期潮湿饱水状态,坡度在 $15^{\circ}$ 左右的自然边坡	软弱土层和水的影响。外荷载作用改变其平衡的状态
	滑坡	斜坡上大量土体和岩体在重力作用下,沿一定的滑动面(或带)整体向下滑动的现象	可根据地形地物标志、地层构造标志、水文地质标志等综合分析识别	按其主滑面类型分为同生面滑坡、接触面滑坡、层面滑坡和构造面滑坡。按其力学特征分为牵引式滑坡和推移式滑坡
	崩塌	在陡峻的斜坡上,巨大岩块在重力作用下,突然而猛烈地向下倾倒、翻滚、崩落的现象	高度大于 $30\text{ m}$ 、坡度大于 $45^{\circ}$ 且上缓下陡的凸坡或凹凸不平的陡峻斜坡;由坚硬(脆或软硬)互层的峻斜坡;以及岩层的利构造和产状组合等构造条件	地形条件、岩性条件、构造条件、其他自然因素等
	岩堆	岩石山坡在各种物理、化学作用下失稳,产生塌滑、剥落,形成大小不一的岩石碎块、岩屑,在自然力的作用下,搬运、堆积物体	地质构造作用强烈、气候干旱、风化严重的山区和高山峡谷地区。岩性软弱易风化的岩层分布区和破碎的花岗岩、石灰岩等组成的山坡坡角区等,多有岩堆出现	岩性和局部地形、地质构造、气候环境条件等。分为正在发育、趋于稳定和稳定等三种岩堆
	泥石流	在暴雨、冰雪融水等水源作用下,发生在水源区沟谷中含有大量沙石块的特殊洪流	地质不良、地形陡峻,有明显的汇水补给、固体物质补给、流通渠道和堆积环境等。沟槽不对称、不固定、沟槽堆积的石块有尖角且无方向性和无明显层面等	1. 按其固体物质组成,分为泥石流、泥石流、水石流; 2. 按其流体性质分为黏性和稀性泥石流
	地面沉降	由于水对地表下岩土体的溶蚀作用或人类活动引发的地表塌陷现象,以及构造物对地基承载力过大引发的地面沉降现象	沉陷周围较显著,道路凹陷明显等	水的因素、岩土体支撑条件改变、人类活动等

续表

类 型	属 性	判 别 标 志	成 因
人 类 活 动	采 空 区	1. 小型采空区: 地表呈塌陷或开裂, 裂缝呈宽下窄且无显著位移。 2. 大型采空区: 地表凹地、地面下沉、地面倾斜等。 3. 矿产地的活动遗迹	人类活动导致岩土体支撑条件的改变
	人 工 边 坡	新增坡度普遍陡于自然坡面, 坡体普遍呈现分台等人工痕迹 防护工程、排水工程人工痕迹	岩土体条件、水环境的改变和突空面等
	人 工 填 土	高出于地表带型的构筑物, 坡面具有一定的规律性, 一般坡面为 1:1.5, 坡面进行了人工绿化和美化	地基承载力不足引发路基崩溃、构造物路面开裂、构造物外倾、路面变形、速度过快引发的路基破坏等

### 1.1.2 山区地质灾害致灾因素的工程危害

山区地质灾害致灾因素的致灾环境条件识别及工程致灾特性的预见是山区建设地质灾害防治措施选择的基础(表 1-2)。

表 1-2 山区地质灾害致灾因素工程危害简表

类 型	致灾环境条件	致灾工程特性	致灾公路工程危害性
特 殊 类 土	软 土	天然含水量、天然孔隙比、直剪内摩擦角、十字剪强度、静力触探锥力、压缩系数	路基沉降与不均匀沉降、路基变形、路面开裂、构造物倾斜; 桥梁基础承载力不足引起桥梁变形破坏、隧道变形等
	膨 胀 土	胀缩性、崩解性、多裂隙性、超固结性、风化特性、强度衰减性	路基变形、构造物变形和开裂破坏、路面变形破坏、路基边坡失稳、隧道变形等
	红 层 软 岩	透水性弱、亲水性强、浸水后岩体强度软化、失水后易崩解, 岩块饱和单轴抗压强度低(小于 30 MPa), 岩体层间抗剪强度低, 特别是层间含水后易产生层间滑动	一般不能直接用作路基填料, 引起构造物地基承载力开裂和沉陷、构造物路面开裂、路面变形破坏、隧道变形等

续表

类 型		致灾环境条件	致灾工程特性	致灾公路工程危害性
地质作用	岩溶	水环境改变、隐蔽性对工程的影响	岩石的可溶性、岩石的透水性、水的溶蚀性、水的流动性	路基沉陷、桥梁基础安全、隐蔽性岩溶对隧道安全的影响、岩溶水对隧道的影响等
	断裂构造	水文地质复杂、节理裂隙发育、岩石破碎、风化严重等	断层的力学性质、位置、产状、发展阶段、水文地质特征等,影响公路建设的规律和采取的工程技术以及工程造价	避让大断层破碎带需增加工程造价,公路建设易引起坍塌、隧道洞顶塌落等
	不稳定斜坡	地质环境和水环境,有潜在滑动面。外在荷载影响等	有滑移的可能性,排水条件较差。受路基土方等外荷载作用,极易引发路基滑移	路基滑移、构造物变位、严重时影响桥梁安全和下方的隧道安全
灾害地质	滑坡	地形地貌及气候环境、地层岩性、地质构造、水、工程活动等外力因素等	滑坡变形速度较快、破坏性强、冲击力巨大	滑坡是山区公路的主要病害之一。堵塞河道、摧毁公路、影响路基稳定和安全、隧道变形、桥梁变位等
	崩塌	地形地貌、气候环境、地质构造、水、工程活动等外力因素等	滑坡变形速度差异较大、破坏性强、冲击力巨大	滑坡是山区公路的主要病害之一。堵塞河道、摧毁公路、影响路基稳定和安全、隧道变形、桥梁变位等
	岩堆	地表水和地下水的影响、工程活动等外力影响	浸水后易局部或整体滑移;向外的层间节理,在外力作用下不易产生沉降滑动;结构松散、孔隙之间不均,稳定性差	路基变形、边坡的稳定问题、地表水和地下水等排导设施破坏、桥梁基础稳定
	泥石流	地形条件下、水文气象要素、地质条件(固体物质的补给)人类活动及植物覆盖	暴发突然、地区性特点很强、属于区域性的工程地质现象、暴发频率差异较大	淤埋公路、堵塞江河、掩埋公路、冲毁桥梁和涵洞、大石块撞击桥梁、冲刷桥梁基础、冲毁公路等
	地面沉降	塌陷后的填充环境及稳定性,导致对策略难以确定	稳定性不易测定,导致构造变形、路面凹陷、桥头跳车等病害	路面沉陷、路基开裂、构造物变形或破坏等

续表

类 型		致灾环境条件	致灾工程特性	致灾公路工程危害性
人类活动	采空区	填充环境和走向、范围、规模、稳定与发展趋势、变形大小等难以调查清楚,导致对策措施难以确定	隐蔽性、无规律性。导致地表塌陷、开裂、地表凹地等地基稳定性问题	路基沉陷、桥梁基础安全、隧道安全、构造物变形破坏等
	人工边坡	坡面地质环境与工程技术对策不协调,气候环境、水环境的改变及其他诱发因素	新增坡面临空面,易诱发牵引式滑坡、崩塌、碎落等边坡病害(边坡失稳)	阻断公路、砸毁路面、破坏公路构筑物、污染路面等
	人工填土	地质环境和水环境、填土速度、填筑材料	在自然地面上堆载,易诱发推移式滑坡,当地基承载力较低时,易产生路基失稳及路面开裂等病害	路基下坡面失稳、构造物外倾、路面变形、开裂、崩溃等

## 1.2 山区高速公路施工安全生产的特点

### 1.2.1 工作环境

(1) 施工流动性大, 施工环境变化频繁。山区高速公路工程的流水施工作业, 使得作业人员经常更换工作地点和环境。高速公路工程的作业场所和工作内容是动态的、不断变化的, 工作环境包含着危险源, 而相应的安全防护设施往往是同步于甚至落后于施工过程(结构施工中)的。随着工程进展, 作业人员所面对的工作环境、作业条件、施工技术等不同发生变化, 由于环境变化频繁, 施工作业人员容易在适应新环境的过程中, 受到环境中的不利条件影响, 使得危险概率增大, 给施工企

业带来很大的安全风险。

(2) 施工项目具有临时性和一次性的特征决定了高速公路工程的安全问题不断变化。施工项目中的结构物、设备、机械、机具、材料乃至人员,都表现出很强的临时性,很难按照同一图纸、同一施工工艺、同一生产设备进行重复生产,导致无法彻底辨识和了解施工中的全部危险源,展开系统的防范和控制。而且,许多施工过程都是在临时设施上进行的,如脚手架、模板等,增加了施工的危险性。

(3) 高速公路施工的高能耗、施工作业的高强度,施工现场的扰动因素(噪声、热量、光线、有害气体和尘土等),以及作业人员长时间高强度的作业等,都是工人经常面对的不利工作环境和负荷情况。

(4) 施工作业中露天作业量大,时间长,其间受温度、气候条件影响大,易受风、雨和雷电等恶劣自然环境的影响,从而导致施工危险性增大。

(5) 施工项目工序多,变化大,环境影响因素突出。施工项目从基础施工到上部结构施工各阶段,工程内容迥异,工序和施工方法也不相同,作业环境也随时改变。其中隐藏的危险源众多,原因各异,导致危险源的辨识困难,危险隐患增加。

(6) 施工项目高处作业多。在山区高速公路施工过程中,高处作业多,同时受到恶劣自然环境的影响,在防护不当时,极易发生高处坠落等安全事故。

(7) 施工作业面狭窄,存在交叉作业多等危险隐患。山区高速公路施工场地狭窄,使施工场地与施工要求的矛盾日益突出。由于进度需要和实际施工条件制约,经常需要多工种、多班组在同一作业面内展开施工作业,在有限的场地集中大量的人力、建筑材料、机械设备进行立体交叉作业,起重机械使用增多,龙门架、井字架亦普遍推广,流水交叉作业大量增加,导致危险源在有限时空内高度集中。在工期紧迫时,安全防护措施不到位,造成机械伤害和物体打击等伤亡事故增多。

(8) 劳动对象体积、规模大,劳动工具粗笨,施工作业者劳动强度高,手工劳动多,作业人员易产生工作疲劳、注意力分散,从而导致误