

摘 要

随着公路建设的高速发展，公路路基地质灾害时常威胁着人民的生命财产安全和公路交通的正常运行。本文依托交通部西部交通科技建设项目“路基灾害防治技术推广及应用示范”课题的研究，在充分总结归纳国内外已有的相关研究成果、以及各地识别公路地质灾害经验的基础上，通过调查、研究和系统分析，研究了路基地质灾害主要类型及影响因素，集成了路基地质灾害识别技术方法，为在全国开展公路地质灾害防治提供技术参考。

首先，针对路基地质灾害问题，广泛搜集了国内外相关文献资料，并进行了分析归纳；通过调研及现场观测等手段，分析了地形地貌、地层岩性、地质构造、水文、植被、气象等自然环境与路基地质灾害形成的关系；同时，研究归纳了路基地质灾害的主要类型与特征。在此基础上，参考了现有灾害研究成果和公路工程规范规程等，总结了公路地质灾害缓变性和突发性的内外特征，提出了路基地质灾害识别的原则和方法。

其次，通过研究路基外部形态、内部结构面及岩土体的工程性质三方面因素与路基地质灾害的关系，以路基工程地质结构为灾害识别的理论依据，分析了路基的破坏方式和规模。

最后，通过对依托工程路段（G316 线陕西省段）灾害整治试点工程的调查研究，结合相关资料的分析归纳，集成了路基地质灾害识别方法，使潜在公路灾害的识别成为可能。先是根据路基地质结构对路基可能发生的破坏形式进行初判，再利用路基地质灾害特征，对破坏形式进行具体判别，从而确定路基地质灾害的类型，最后提出各灾害的野外识别指标；采用经验法对识别指标进行赋值，使公路路基地质灾害危险性识别从定性分析向定量计算转变，并建立了识别指标体系，对灾害的危险性进行判别。将研究成果在依托工程庙岭滑坡识别中进行了应用，达到了较好的效果。

关键词：路基，地质灾害，路基工程地质结构，识别方法，危险性

Abstract

With high-speed development of road construction, geological hazard threaten the security of the people's lives and properties and the normal highway communication running. Combining the research of one subject of western communications science and technological project named *subgrade disaster prevention techniques extension and application demonstration*, this paper based on existing relevant research results both at home and abroad and experience to recognize the highway geological hazard, through investigation, theoretical analysis and research, sum up the type and characteristic of subgrade geological hazard, summarize the recognition technology for geological hazard of subgrade. The method offer technology reference to prevent and control highway geological hazard in the whole country.

First of all, aiming at the subgrade geological disasters this paper gets a extensive collection of relevant literature about both at home and abroad ,then we analysed and summarised the obtained information.Through research and on-site observation and other means,we analysed the relationship between the nature environment of topography and geomorphology, formation lithology, geological structure, hydrology,vegetation,weather and the formation of Subgrade geological disasters.At the same time,our reseach summarized the mian types and characteristics of subgrade geological disasters.On this basis,we have referenced to the current disaster reseach and the standard rules of highway engineering,sumerized the internal and external characteristics of highway geological disaster variability and abruptness,finally we put forward to principals and methods to identiy the roadbed geological disasters.

In the next place,through the reseach on the relationship between the subgrade external morphology ,internal structural plane and engineering properties of rock and soil mass and the subgrade geological disasters,we presented subgrade engineering geological structure theory which determine the failure mode and scale of subgrade,it is also a main basis of disaster indentification.

Finally,we combined relevant data analyzing inductions,through study in disaster training

road sections based on project,integrated technical methods of subgrade geological indentification,which make the potential highway disaster indentification possible.Firstly,based on the subgrade geological structure types, we prinimarily judged the possible subgrade failure mode;then,make use of geology disaster feature,concretely judged the failure mode,thus conform the types of geological disaster;finally,we presented field indentification critetion of disasters.Using empirical methods to valuate distinguishing indexes,transformed the qualitative analysis of subgrade geological disaster hazard indentification to quantitative caculations and established a system of distinguishing indexes,distinguished the hazardous of disasters.We applied this in the demonstration project of Miaoling landslide indentification and get a good results.

Keywords: subgrade, geological disaster, subgrade engineering geological structure, recognition method, hazardous

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：李志强 2009年6月7日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：李志强 2009年6月7日

导师签名：田伟平 2009年6月7日

第一章 绪论

1.1 研究背景

我国幅员辽阔，地形、地质、气候条件多样，山地面积约占国土总面积的69%，地质环境十分复杂。交通基础工程是一项空间跨度大的带状工程，需要跨越不同的地区、不同的地质单元，它的特殊性在于工程不局限于“一点”或“一面”，因此它势必会以各种方式影响周围生态环境，引发不同的地质环境问题，导致地质环境灾害的发生。同时，交通基础设施也受地质环境的影响，各类环境地质灾害对公路交通基础设施危害极大。

目前，我国公路在线路长度、客运量、货运量、客运周转量等方面均遥遥领先于其他运输方式的总和。公路在建设中不可避免地要穿越各类地貌单元，涉及各种复杂的地质和地形条件，常常需要穿越不良地质地段；公路建设中修筑高路堤、架设高架桥、开挖高边坡或修建隧道，开挖或回填土石方等工程活动，易对沿线地区的地质环境造成影响，引起地质问题。而公路也受到沿线地质环境的影响，各类地质灾害如崩塌、滑坡、路基沉陷、泥石流等，也对公路的运营造成不同程度的影响。我国各省位于地质灾害中危险区以上的公路里程数为26950.03km。

今后 20~30 年内将是我国公路建设持续增长期，而且不仅是数量的增长，更重要的是质量的提高。未来的高速公路建设多是在山地等特殊条件地区进行，各种特殊地质灾害问题的影响，将更为显著。

随着公路建设事业的迅速发展，路网不断完善，公路运输在国民经济活动中越来越重要。但是，由于受自然环境条件、历史原因、当地经济发展水平等因素的制约，相当多的干线公路，尤其是山区公路，在建设和运行过程中受到不良地质条件、地质灾害、暴雨、洪水等因素的严重影响，加上一些路段的等级偏低、抗灾能力差，使得部分干线公路灾害频发，不可避免地遇到大量的地质灾害，如滑坡、崩塌、泥石流等。在山区公路建设过程中大量的高填深挖会造成植被破坏、水土流失、地质条件恶化，导致大量的崩塌、滑坡、泥石流等人为的地质灾害。山区地势起伏大，地形破碎，沟谷众多，地质条件十分复杂，决定了公路发生各种地质灾害的必然性。

我国几乎所有的山区公路都不同程度地受到“崩滑流”灾害的威胁，例如川藏公路沿线分布有泥石流沟 1036 条，滑坡 419 处，崩塌 1525 处，受害路段总长 3176 公里。川

滇、川陕、甘川、昆洛、成兰、滇黔等公路崩滑流灾害也十分严重。据统计我国由地质灾害造成的损失占各种灾害损失的 35%。在地质灾害中，崩塌、滑坡、泥石流及人类工程活动诱发的浅表层工程地质灾害造成的损失占一半以上，每年损失约 200 亿元。可见，地质灾害对公路交通的制约和威胁已经十分严重。由于历史和技术等方面的原因，我国干线公路防护设施尚不完善，抗灾能力弱，使我国公路交通抵御自然灾害的能力较低。汛期国道、省道交通中断时有发生，严重影响了公路通行能力和交通运输安全，对公路交通可持续发展提出了挑战。

路基地质灾害的频繁发生，对公路交通影响很大，可能导致一段路或整段路的损毁，交通受阻时间较长，对地区经济发展和居民生活的影响很大。长期以来我国对公路地质灾害开展了广泛深入的研究，取得了许多有价值的研究成果和丰富的工程经验，为公路灾害防治提供了丰富的技术储备，同时奠定了进一步研究的基础。

为全面提高公路抗灾能力，保障公路畅通，减小公路灾害对经济社会发展的制约，总结、推广已有的公路灾害防治研究成果和技术显得十分迫切。通过研究公路减灾防灾的新技术和对策，为交通部“干线公路灾害防治工程”试点和推广工作提供技术支持，提出一整套科学、有效、全面、经济合理的公路路基灾害防治方法，对于提高我国公路抗灾能力、充分保障公路基础设施的完好和公路交通运输的畅通，显著减小因公路灾害造成的经济损失和社会影响，具有极其重要的现实意义。

路基地质灾害类型主要有：崩塌、落石、碎落、坍塌、滑坡、泥石流、路基沉陷等。本文中主要研究公路工程中常见的三种灾害：崩塌、滑坡和路基沉陷。

本文依托交通部西部交通科技建设项目“路基灾害防治技术推广及应用示范”，主要从地质灾害入手，在充分总结归纳国内外已有的相关研究成果、吸收各地区治理公路地质灾害成功经验的基础上，通过资料分析、现场调查以及理论研究，分析了路基地质灾害的特征、成因机理、形成条件和控制因素，提出了路基地质灾害识别方法，为在全国开展公路地质灾害防治提供技术参考。

1.2 国内外研究现状

19 世纪中叶起，随着社会经济的发展，地质灾害不断威胁着人类的生产活动，使得西方国家开展了对地质灾害的研究。二次世界大战后，随着各国经济的大发展和国土的开发利用，建设规模愈来愈大，范围愈来愈广，尤其在山区和丘陵地区中遇到的地质灾害愈加严重，促进了地质灾害研究的深入发展。

1978年, R. L. Sehuster 和 R. J. Krizek 等十六位专家根据 20 年的研究和实践编写了《滑坡的分析与防治》一书, 书中第三章介绍了滑坡的认识与鉴别, 将影响滑坡的各类因素归结到通过地形特征去认识和鉴别滑坡^[1]。

1989年, 日本矢野義男等在《泥砂、泥石流、滑坡、崩塌防治工程手册》一书中论述了滑坡、崩塌的地形特征。

早在 BC186 年, 我国就已经能够认识滑坡类型, 提出了“地滑”、“走山”和“垮山”等名词^[2]。而全面系统地分析研究地质灾害, 则是从 20 世纪才逐渐发展起来。

1975年, 《工程地质手册》编写组编写的《工程地质手册》一书中简要介绍了从地貌上识别滑坡, 从地层对比识别滑坡, 从水文地质条件上识别滑坡以及根据滑坡裂缝判断滑坡性质^[3]。

2000年, 金波在滑坡防治专家系统一文中, 扼要介绍了滑坡识别模块的组成, 主要包括: 斜坡发生滑坡的必要条件判别; 滑坡地区地形地貌特征识别; 地层岩性特征识别、地表裂缝与建筑物变形迹象识别以及河岸堆积物识别。金德濂在“水利水电工程边坡的工程地质分类(下)”一文中介绍了 12 条野外判断滑坡的特征, 主要也是根据滑坡的表面特征对滑坡予以判别^[4]。

2001年, 武雄等在三峡巨型古滑坡系统“滑坡岩体”的鉴别方法研究一文中, 提出利用细观、微观地质特征结合宏观地质特征来鉴别“滑坡岩体”的新方法。

2002年, 邓必胜在“工程地质勘察中滑坡的识别及其防治”一文^[5]中, 提出了识别滑坡的地物地貌、滑坡边界及滑坡床、水文地质等标志。

2004年, 李坚在河谷地区滑坡识别与整治措施探讨一文^[6]中, 重点介绍了从地形地貌上的研究, 尤其是微地貌的研究, 进行识别河谷地区滑坡的方法。吴树仁等在“滑坡预警判据初步研究-以三峡库区为例”^[7]一文中, 根据对典型滑坡变形发展的阶段性变形现象、标志和临界诱发因素分析, 提出了滑坡空间预测识别的 11 条判据。

2004年, 王恭先等在《滑坡学与滑坡防治技术》一书中主要介绍了根据表面特征识别滑坡(现代滑坡、古老滑坡和潜在滑坡), 而且也讨论了遥感技术在滑坡调查中的应用。

2005年, 史海智通过对唐房滑坡的详细地质调查、工程钻探、开挖探槽和取样试验, 查明滑体地层结构, 地下水发育特征, 对其范围进行圈定, 提出了滑坡识别判据^[8]。

2006年, 邵铁全在博士论文《滑坡地质灾害超前地质预判技术研究》中, 首次提出了滑坡超前地质预判的基本方法: 单要素预判法和综合要素预判法。具体方法有地层岩性预判法、地质构造预判法、地形地貌预判法、易滑要素叠加法、滑坡要素预判法、遥

感影像预判法。并根据地层、构造、地形地貌等要素的易滑序列的分析,本着相对独立、由宏观到细观的原则,将地层、构造、地形地貌等要素易滑序列分别概括为四级 17 项、11 项、8 项,各级易滑序列适用于不同尺度或精度的滑坡初步判别-斜坡易滑性的判别。将滑坡超前地质预判的工作程序分为资料收集与整理、初步判别、再次判别和精细判别等阶段。并对 G316 安康-旬阳-蜀河路的滑坡进行了预判,是较为有效的一种滑坡系统判别和预测的技术方法,可用于不同尺度或精度的滑坡地质灾害调查、识别等阶段的研究^[9]。

2007 年,戚宗柯,钟志芳,向贤礼等通过对公路滑坡的调查分析,提出了识别滑坡灾害的地质地貌依据^[10,11,12]。

综上所述,对路基地质灾害识别的文献资料较少,而且大多都是对滑坡特征进行的识别。随着我国经济飞速发展,特别是基础设施建设投入力度加大,由公路建设引起的地质灾害问题日趋严重,这一方面是由于路基地质灾害类型较多,各类灾害特征也不尽相同,给路基地质灾害识别带来了一定的难度;另一方面是由于人们在工程实践中对路基地质灾害识别及地质地貌特征重视不足的结果。因此,建立和完善路基地质灾害识别方法具有十分重要的现实意义。

1.3 研究内容

公路地质灾害识别方法研究的内容主要包括以下几个方面:

1.识别原则

识别原则是进行识别工作的基本指导准则。遵从什么样的识别原则,便决定了选择什么样的识别判据,采用什么样的识别方法和识别步骤,达到什么样的识别结果。通过现有对公路灾害调查、遥感监测及有关专业灾害预判的分析研究,结合地质灾害缓变性和突发性的内外特征以及路基工程地质结构类型,确定公路地质灾害识别的原则和方法。

2.路基工程地质结构分析研究

路基工程地质结构是进行灾害识别的基础和前提,它决定了破坏方式、破坏规模,也是病害治理措施选择的主要依据。路基工程地质结构是由外部形态、内部结构面以及路基岩土组合而成的系统。

路基断面类型不相同,路基发生破坏的部位和方式也不相同;路基内部结构是路基范围内岩土体的分布和排列顺序、位置、产状及其与临空面之间的关系,构成了路基灾

害的地质基础。

3.路基地质灾害识别方法研究

以前的公路灾害识别主要是根据对遥感图像的分析和研究,或依据监测技术来达到对灾害规模和发展阶段的识别,本文通过野外调查,根据对路基工程地质结构、岩土体工程性质及地质地貌等主要特征的分析,对公路路基地质灾害进行识别。

公路路基地质灾害识别方法是指不借助勘探技术手段,主要通过地质地貌特征、路基几何形态、岩土体性质及一些地表和建筑物的变形和破坏迹象的分析,依据路基工程地质结构做出灾害的初步判断,再根据地质灾害预判特征和识别指标做出具体路基地质灾害的判断,并能识别其危险性的一种技术方法。

1.4 技术路线

公路地质灾害识别属于公路工程与地质学、灾害学、岩土工程等学科的交叉领域的研究范畴,具有很强的综合性。应根据公路建设现状、充分考虑环境影响因素的特点,全面深入分析公路灾害特征,广泛参考和借鉴地质工程和自然灾害及相关专业的方法和经验。

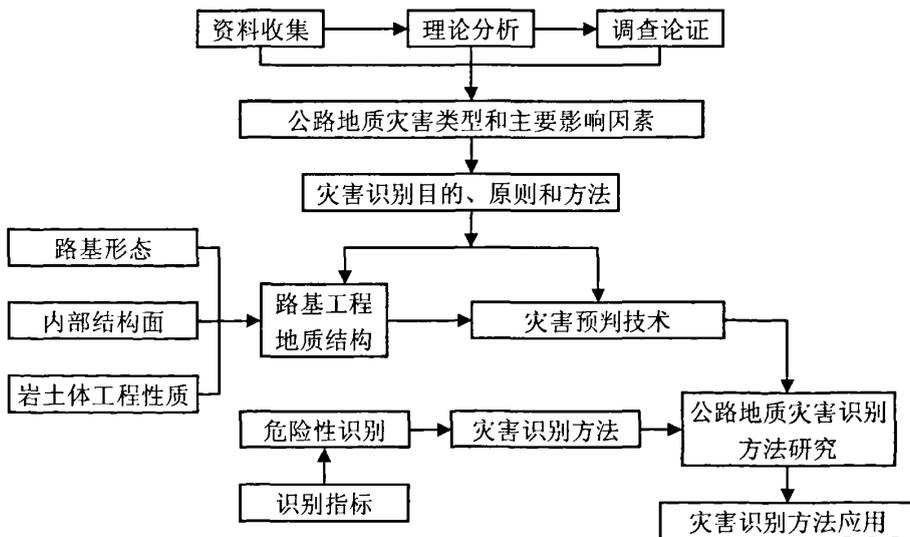


图 1.1 公路地质灾害识别方法研究技术路线框图

通过资料收集、分析和广泛调查论证,明确灾害识别的目的、工程需求、服务目标和范围;通过深入分析研究,确定公路地质灾害识别的原则、方法;从危险性评价、灾害预防、灾害治理等对公路地质灾害识别的需求出发,提出我国公路地质灾害识别方法,技术路线如图 1.1 所示。

第二章 公路路基地质灾害及其影响因素

经过资料查阅和野外调研发现,路基地质灾害的影响因素虽多,但主要是受地质条件的影响。而路基地质灾害发生的地质条件主要包括地形地貌、地层岩性、地质构造,这些条件是地质灾害发生的内在条件,其对路基地质灾害的发生、发展是必不可少的,对路基的变形破坏起着主要的控制作用^[13]。

2.1 崩塌

崩塌是指陡峭斜坡上的岩、土体在重力作用下突然脱离山体崩落、滚动,堆积在坡脚的自然现象。规模巨大的崩塌称为山崩,规模小的个别岩块称为落石。

崩塌的主要特征:崩塌体脱离母岩而运动;下落速度快、发生突然;下落过程中崩塌体自身遭到整体性的破坏;崩塌物的垂直位移大于水平位移。具有崩塌前兆的不稳定岩土体称为危岩体。

2.1.1 崩塌的分类

崩塌按照坠落物的规模、范围、大小可分为剥落、坠石和崩落等类型。剥落的块体较小,块体大于 0.5 米者占 25%以下,产生剥落的岩石山坡一般在 30~40°;坠石的块体较大,块体大于 0.5 米者占 50~75%,山坡脚在 30~40°范围内;崩落的块体更大,块体大于 0.5 米者占 75%以上,山坡角大于 40°^[14]。

(1) 按崩塌体的物质组成划分:基岩崩塌;岩层崩塌;黄土崩塌;(除黄土外不细分)土质崩塌。

(2) 按崩塌体的规模(土石体的体积计)分为:小型崩塌<10万m³;中型崩塌10~100万m³;大型崩塌100~1000万m³;巨型崩塌>1000万m³。

(3) 按崩塌体的主要诱发因素划分:暴雨诱发的崩塌;水库蓄水诱发的崩塌;地震诱发的崩塌;人为活动(包括道路、桥梁,矿山开采及水渠工程建筑开挖等)诱发的崩塌;诱发因素不明的崩塌。

2.1.2 崩塌的影响因素

山区公路挖方边坡是有利于崩塌发生的部位,坡度大于 1:0.5 的高陡边坡尤其要注意崩塌灾害的发生^[15]。

崩塌的影响因素很多,主要有地貌、地质构造、岩性、风化作用、地下水、地震等,

开挖坡脚也会引发崩塌灾害。

1,地貌与崩塌发生的关系

长期上升剧烈的分水岭山区,往往是岩性较坚硬的地区,在这些地区的高边坡易发生崩塌现象。峡谷山区,岸坡陡立,线路通过高陡的路堑边坡,据统计表明崩塌大部分发生在坡度大于 45° ,高度大于20m的高边坡上。

2,地质构造与崩塌发生的关系

(1) 在断层交汇及断层破碎带处崩塌灾害集中出现,特别是在几组构造交汇的峡谷山区往往形成大型的崩塌。

(2) 在褶曲发育的千枚岩、片岩构造的边坡上,有各种弧形结构面,当其倾向线路时,多沿弧形结构面发生崩塌。

(3) 火成岩体中有后期侵入岩脉时,这些穿插面是边坡岩体中的薄弱面,它们与岩体中的各种构造裂面组合在一起并倾向线路时,易发生崩塌现象。

(4) 如果巨厚层的完整坚硬岩层夹有薄层页岩时,当岩层倾向线路时,高陡边坡易发生大规模崩塌灾害。

3,岩性与崩塌发生的关系

岩土体是发生崩塌的物质条件。不同类型的岩土体所形成崩塌的规模、大小不同。崩塌大多数发生在坚硬或半坚硬的岩石地段,主要是灰岩、千枚岩、泥灰岩、页岩、辉长岩、砂岩、辉绿岩、板岩、闪长岩和花岗岩,尤以碳酸盐岩和岩浆岩居多。根据对岩石回弹值的测定,崩塌现象主要发生于回弹值大于20的坚硬、半坚硬的岩体之中。

4,风化作用与崩塌发生的关系

边坡上的岩体在各种风化营力长期作用下,其强度和稳定性会不断降低,最后可能导致崩塌的发生。

(1) 坚硬岩石的风化程度越高,其强度越低,发生崩塌的可能性就会越大。

(2) 边坡上不同岩体的差异性风化,可能导致崩塌灾害的发生。如果岩体是由岩性不同的成层岩体组成,由于软弱岩层抵抗风化能力较低,风化速度快;坚硬岩石抵抗风化能力强,风化速度慢;边坡由于风化差异变得凹凸不平,长期风化,悬空而突出的岩体就可能发生崩塌现象。

(3) 边坡上不稳定的岩体下部有倾向线路的结构面时,如果被粘土质风化物充填或发生泥化作用,不稳定岩体可能发生崩塌。高陡边坡上的岩土体,不仅表面易遭受风化作用,而且由于在大气降水、地下水、环境湿度等风化营力的长期作用下,易形成泥化

夹层。此外岩体中的裂隙有时可能会被粘土质风化物充填。泥化夹层，泥化结构面和黏土质充填物都会在很大程度上降低边坡岩体的抗剪强度和稳定性，将导致不稳定岩体的崩塌。

(4) 如果切割山坡上的风化壳、高陡边坡可能沿强弱风化界面发生崩塌。山坡上的岩层经长期风化作用，形成风化覆盖层，沿坡向上风化层增厚，如果在山坡下部开挖深路堑，切断风化层，山体会失去平衡，可能形成规模较大的崩塌。

5. 地下水与崩塌发生的关系

地下水在天然斜坡上或边坡上出露，表明边坡岩体中发育有连通的节理裂隙，能得到较远地下水的补给，说明节理裂隙延伸较远；如果地下水在坡脚或在边坡上以线状出露，则表明边坡上有延伸较远的倾向线路的含水结构面。这种情况下边坡稳定性较差，可能发生崩塌灾害。出水带越长，距离坡脚越近，不稳定岩体的规模也就越大。斜坡和边坡上的地下水，在雨季大多数可以直接得到大气降水的补给，其流量将大大增加，在这种情况下雨水和地下水的联合作用，会使边坡上的岩体更易于失稳，它们的作用主要表现在以下几方面：

- (1) 充满裂隙的水及其流动性，对不稳定岩体产生静水压力和动水压力。
- (2) 充满裂隙的水，对不稳定岩体会产生向上的浮托力。
- (3) 裂隙与其它结构面中的充填物在水的浸泡下，抗剪强度大大降低。
- (4) 不稳定岩体裂隙中充满的水，会使不稳定岩体与稳定岩体之间的侧向摩擦力减小。

6. 植物生长与崩塌的关系

根系作用能促使崩塌灾害的形成：生长在岩石裂缝、节理和层面中的树木，由于其根部的不断延伸和变粗，使岩石裂缝、层面和节理不断张开，造成岩体进一步破坏，从而导致崩塌的形成。

2.2 滑坡

滑坡是指一定自然条件下的斜坡，由于河流冲刷、地下水活动、人工切坡或地震等因素的影响，使部分土体或岩体在重力作用下，沿着一定的软弱面或带，整体、缓慢、间歇性、以水平位移为主的变形现象。滑动后形成环状后壁、台阶、垅状前缘等外貌。在平面形态上，滑坡一般具有一定的几何形状，如椭圆形、三角形及其它几何形态或不规则形态。在主轴断面上，滑坡的滑动面与水平面的夹角各个阶段是不同的。滑坡的滑

互摩擦而形成的痕迹，它指示滑坡滑动的方向。

滑动面一般呈光滑镜面，多有擦痕。其形状在均质土中多为弧线或曲线状；在堆积土中多呈折线或直线与曲线组合状，在岩石滑坡中呈直线、折线或曲线状。

滑动带土的含水量一般较其上、下土层为高，软弱，呈可塑或软塑状，黏土颗粒含量也较多，色杂，揉皱严重。由于受滑体滑动力与滑坡床阻滑力一对剪切力偶的作用，在滑动带中常形成由张扭性和压扭性结构面构成的网状裂缝。有时在压性结构面上也形成擦痕。在岩石顺层滑坡中由于受构造作用影响，可在滑动带上、下形成两个滑动面。

(5) 滑坡床：滑动面以下的不动岩、土体称为滑坡床。

(6) 滑坡剪出口：滑动面最下端与原地面相交而剪出的破裂口叫滑坡剪出口，简称滑坡出口。在滑坡滑动之前它表现为地面隆起、挠出，或建筑物被剪断，滑动之后常被埋入滑坡体之下。

(7) 滑坡舌与滑坡鼓丘：滑坡体从滑坡剪出口滑出后伸入沟、壑、河道或台地上形似舌状的部分称为滑坡舌。由于滑动面反挠或滑坡体前部受阻，该部分常形成垂直滑动方向的一条或数条土垅，称为滑坡鼓丘。

(8) 滑坡台阶和滑坡平台：滑坡体在滑动中因上下各段的滑动次序和速度的差异，在其上部常形成一些错台，每一错台形成一个陡壁，此称为滑坡台阶。宽大的台面叫做滑坡平台，有时该平台具向山缓倾的反向坡，叫反坡平台，是滑坡的一个典型地貌特征，尤其是沿弧形面旋转滑动的滑坡。

(9) 滑坡后缘：主滑壁与山坡原地面的交线称为滑坡后缘。

(10) 滑坡前缘：滑坡舌前部与原地面线的交线叫做滑坡前缘。

(11) 滑坡洼地或滑坡湖：滑坡滑动后，滑坡体与主滑壁之间拉开成沟槽或陷落成“地堑”状，相邻土楔向山反倾形成四周高、中间低的洼地，称为滑坡洼地。当滑坡壁向外渗水或地表水汇集于洼地中形成渍泉湿地或水塘时，就称为滑坡湖。

(12) 拉张裂缝与主裂缝：位于滑体上部因滑坡体下滑而张开的长数十米至数百米、方向与滑坡壁吻合或大致平行的裂缝称为拉张裂缝，其中与主滑坡壁重合的一条称为主裂缝。

(13) 剪切裂缝：位于滑坡中下部的两侧，因滑坡体与两侧不动体间发生剪切位移而形成的裂缝叫做剪切裂缝。它形成滑坡的两侧边界。

(14) 羽状裂缝：滑坡体两侧剪切裂缝尚未贯通前因动体与不动体间相对位移剪切而形成的呈羽状(雁行状)排列的张裂缝称为羽状裂缝。

(15) 鼓胀裂缝: 滑坡体下部因下滑受阻挤压隆起形成垣垅(鼓丘)在其上形成垂直滑动方向的鼓胀裂缝。

(16) 放射状(扇形)张裂缝: 滑坡体下部因下滑受阻而形成的顺滑动方向的压张裂缝, 在滑坡主轴部位大致平行滑动方向, 两侧呈放射状(扇形状)分布。在滑坡大滑动前它先于鼓胀裂缝和滑坡剪出口出现, 是抗滑段受挤压的标志。滑坡滑动后滑体向两侧扩展也可形成张裂缝, 在舌部呈放射状分布, 故称为放射状张裂缝或扇形张裂缝。

(17) 牵引性张裂缝: 主滑壁以外因失去侧向支撑而形成的尚未滑动的断断续续的张裂缝, 称为牵引性张裂缝。它预示着滑坡可能扩大或主滑壁可能坍塌的范围。

(18) 主滑线(滑坡主轴): 滑坡体上滑动速度相对最快的纵向线叫主滑线, 也称为滑坡主轴。它代表滑坡整体滑动的方向, 可为直线或曲线, 位于滑体后缘最高点与前缘最远点的连线上、滑坡体最厚、滑坡推力最大的纵断面上。

2.2.1 滑坡的分类

滑坡的分类是认识滑坡的基础, 根据滑坡体的组成物质、发生时代、受力状态、滑体规模、滑体厚度、滑体剪出口位置、滑动速度等因素有各自不同的分类方法(表 2.1)。

表 2.1 滑坡分类^[17]

序号	分类指标	类型
1	按滑体物质组成	土质滑坡—粘性土滑坡, 黄土滑坡, 堆积土滑坡, 堆填土滑坡
		岩质滑坡—层状岩体滑坡, 块状岩体滑坡, 破碎岩体滑坡, 坡脚软岩滑坡
2	按滑体受力状态	牵引式(后退式)滑坡
		推动式滑坡
3	按滑坡发生时代	古滑坡(全新世以前发生的)
		老滑坡(全新世以来发生, 现未活动)
		新滑坡(正在活动的)
4	按主滑面与层面的关系	顺层滑坡(主滑面顺层面)
		切层滑坡(主滑面切割层面)
5	按滑坡的规模	小型滑坡(<10 万 m^3)
		中型滑坡($10\sim50$ 万 m^3)
		大型滑坡($50\sim100$ 万 m^3)
		特大型(巨型)滑坡(>100 万 m^3)
6	按滑体含水状态	一般滑坡
		塑性滑坡
		塑流性滑坡
7	按滑体的厚度	浅层滑坡(厚度 $H<6m$)
		中层滑坡($6m<H<20m$)
		厚层滑坡($20m<H<50m$)
		巨厚层滑坡($H>50m$)

表 2.1 滑坡分类^[17] (续)

序号	分类指标	类型
8	按滑面剪出口位置	坡体滑坡 (剪出口在边坡上出露)
		坡基滑坡 (滑动面在边坡脚以下)
9	按滑坡滑动速度	缓慢滑坡
		间歇性滑坡
		崩塌性滑坡
		高速滑坡
10	按滑坡发生与工程活动关系	自然滑坡
		工程滑坡

2.2.2 滑坡的影响因素

滑坡的影响因素十分复杂, 其中最主要的有地形地貌、地质构造、地层岩性、坡体结构、水文地质条件、气象条件、植被等^[18,19]。它们决定滑坡变形破坏的规模和形式, 对滑坡的稳定性起控制性作用, 尤其对岩质滑坡的影响显著。

1. 地形地貌的影响

滑坡与其周围的地形地貌有着密切的联系, 只有斜坡处于一定的地貌部位, 具备一定坡度, 才可能发生滑坡灾害。发生滑坡的地形一般是: 滑坡后有断壁或者陡斜坡, 其下有平坦地带或连续凹地, 继续向下是缓斜坡, 缓斜坡再往下是稍陡的斜坡。滑坡后部的滑坡壁及其下部的凹地是滑坡地形的特征, 凹地带形成沼泽、湿地。滑坡地形多数排列成带状和直线状。滑坡分布与地形地貌的关系为^[20,21]:

(1) 长期上升剧烈的分水岭山区, 由于岩体较坚硬、节理发育, 但地下水不丰富, 所以滑坡较少见, 但崩塌现象较多。

(2) 中等或深切割 (相对高度大于 500m) 的峡谷区, 岸坡陡立, 崩塌较多, 但滑坡较少。

(3) 反映构造运动相对平静或岩性软弱的宽谷地段, 多由河流阶地或平缓斜坡组成, 滑坡中一般很少见河流阶地; 谷坡下部为坡积, 上部为冲蚀的坡型, 坡度在 20°~30°之间, 一般不会发生滑坡灾害; 重力堆积型坡, 是古滑坡的堆积地貌, 在自然或人为因素作用下易复活, 是最不稳定的山坡。

(4) 在峡谷陡坡地区的局部缓坡区, 是水流-重力堆积地貌或重力堆积地貌, 是由以前的古错落、古岩堆、古滑坡或洪积扇所组成, 所以在开挖时常会出现古老滑坡的复活或发生新滑坡。

(5) 山区盆地边缘区的丘陵地貌, 是粘性土滑坡和岩石滑坡集中分布的地貌单元。坚硬岩层分布区, 在顺层条件下, 会连续产生许多顺层滑坡; 在易风化为粘性土的岩层

(如泥灰岩)分布区,以及第三系、第四系湖盆边缘的低丘地区,则常常会有残积成因的粘性土滑坡成片出现。

(6) 凸出山嘴或凸形山坡,当岩层倾向临空面时,可发生顺层岩体滑坡;有断层通过时,则会发生构造面破碎岩石滑坡。

(7) 单面山缓坡区常常发生沿层面的堆积层滑坡和顺层滑坡。单面山是由于岩性差异而形成陡崖与洼槽相间的特殊地貌,以及沿岩层走向的构造线,所以当山体是由软硬相间的岩层组成时,往往会发生大量顺层滑坡;若是由软层组成的洼槽,则洼槽下往往为坡积、崩积或洪积形成的堆积物所占据,在地下水作用下易发生堆积层滑坡。

(8) 线状延伸的断层陡崖或其下的坡积、崩积地貌常分布有堆积土滑坡,在节理裂隙水或其它地表、地下水作用下,常发生堆积物沿下伏基岩面的滑坡。

2.地质构造的影响

(1) 不同构造单元及活动性强的构造的交接带,滑坡分布较集中。

公路线路穿过大褶皱轴部、断褶带、块断带等活动性强的构造单元山坡多不稳定。

(2) 滑坡较为集中地分布在褶曲轴部。轴部岩层往往破碎严重,因此在褶曲轴部多分布有堆积土或破碎岩石滑坡。

(3) 滑坡常集中分布于大断层带附近

大断层带附近岩层往往比较破碎,有利于地下水活动和滑坡的发生,发生滑坡的类型则是堆积土滑坡或破碎岩石滑坡。

当线路近平行于断层走向时,滑坡具有连续分布的特点;当几条断层交错时,则往往在交错位置有大型滑坡或滑坡群出现;当线路与断层走向直交或斜交,且断层破碎带较大时,也可能发生滑坡;如断层上岩石破碎,滑坡发生的可能性更大。在非岩层顺层倾向路线的地区,如果出现岩石滑坡(或破碎岩石滑坡),则往往与大的断层带走向近平行路线。

(4) 公路路线与主构造线平行且岩层破碎易发生滑坡;

各种不同成因类型的结构面,包括不同风化程度的岩石接触面,当其垂直临空面方向形成上陡($>60^\circ$)下缓($<10^\circ\sim 40^\circ$)的空间组合,并且因各种原因切割而暴露了该软弱结构面时易发生滑坡。

(5) 地震震级较高的山区滑坡分布集中。

3.地层岩性的影响

地层岩性是滑坡发生的物质基础,不同地层岩性具有不同的强度,往往形成不同的

坡率和坡形,虽然不同岩性、不同地质时代的地层中都可能发成滑坡,但滑坡产生的规模和数量与岩性有密切的关系。

坡体如发生滑坡,必须有发育为主滑带的岩层,其强度低,在坡体应力作用下容易变形,迫使滑坡体内水向主滑带集中;主滑带水化性强,遇水后剪切强度锐减,从而发生剪切破坏。即在坡体有向临空面一侧倾斜的、具有不良岩性的一层,主滑带可能形成并发育成滑坡^[22]。比如:由沉积岩组成的滑坡,其沉积岩层常夹有软弱岩层(如厚层灰岩中夹泥灰岩,砾、砂岩中夹页岩,薄层泥岩等),这些软弱岩层常易形成滑动面(带)。

根据大量的滑坡调查研究发现,我国最易发生滑坡的地层有以下类型^[23]:

(1) 黄土滑坡,各种成因、各时期的黄土,均可发生滑坡:

- ①沿老黄土中古土壤层或砂卵石层或钙核层滑动;
- ②新黄土沿老黄土顶面滑动;
- ③次生黄土沿原生黄土顶面或其中不同成因黄土堆积层顶面滑动;
- ④黄土沿下伏基岩顶面滑动。

(2) 粘性土滑坡,常产生滑坡的有:

①裂隙粘土:褐、红、白、黄、灰白等色的坡积、湖积、冲积的粘土,特点是富含蒙脱石、伊利石,裂隙发育,干湿效应明显,也称膨胀土。

②残积粘土:开挖后易沿堆积面滑坡。

(3) 堆积土滑坡:除以上两类外,包含其余所有的第四系堆积物,其中常发生滑坡的有:

- ①坡、洪积为主的砾石土;
- ②坡、残积为主的碎石土;
- ③崩积、崩坡积,古岩质滑坡堆积的碎石土。

(4) 岩石滑坡,岩石易发生滑坡的有:

①千枚岩、板岩、片岩等;

②各种页岩、泥灰岩、泥岩、凝灰岩等软岩,或砂岩、喷出岩、石灰岩等硬岩与软岩共同组成各种岩组;

③半成岩的各种沉积岩;

④风化严重,强度降低,但未松散破碎,岩体尚完整的各种岩石。

(5) 堆填土滑坡,人工填筑的路堤土及弃土,常发生:

①路堤边坡滑坡及沿地面滑动的堆积土滑坡;

②因斜坡弃土发生的沿倾斜基岩顶面的滑坡；

③由于基底松软潮湿，因高路堤而发生的基底以下的滑坡。

(6) 破碎岩石滑坡，岩体松散破碎、失去完整性的各种岩石。按破碎主要原因分为：

①风化破碎岩石-严重风化后，松散破碎的岩石；

②构造破碎岩石-断层带及强烈挤压的较小褶曲轴部的破碎岩石；

③古岩石错落体(有的被松散堆积物所覆盖)。

4. 坡体结构

坡体结构控制了边坡滑坡发生的部位和破坏模式，王恭先总结了不同坡体结构可能发生的滑坡模式（见表 2.2）。

表 2.2 坡体结构与滑动模式^[24]

序号	坡体结构		滑动模式
	基本类型	亚类型	
I	类均质结构	粘性土结构 黄土状土结构 风化残积土结构 堆填土结构	旋转滑动
II	近水平层状结构 ($\alpha < 10^\circ$)	河湖泊沉积层状结构 黄土软岩层状结构 软硬岩土结构 厚层硬岩下伏软岩结构	顺层滑动 切层滑动 切层滑动 挤出性滑动
III	顺倾层状结构 ($\alpha > 10^\circ$)	黄土顺倾层状结构 堆积层顺倾层状结构 岩层缓倾层状结构 岩层陡倾层状结构	顺层滑动 顺层滑动 顺层滑动 顺层-切层滑动
IV	反倾层状结构 ($\alpha > 10^\circ$)	缓倾层状结构 陡倾层状结构	切层滑动 倾倒-切层滑动
V	碎裂状结构	碎块状结构 碎裂状结构	旋转滑动 顺构造面滑动
VI	块状结构	似层状结构 眼球状结构	顺构造面滑动

5. 水文地质条件的影响

水文地质条件对滑坡的影响主要有地表水和地下水。在滑坡的外在因素中，水对滑坡稳定性影响尤为突出，每当雨季，滑坡灾害频繁发生，很多滑坡灾害都是发生在地下水比较丰富的地带。

地下水对滑坡的作用主要表现在：软化岩土，降低岩土体的强度，产生动水压力和孔隙水压力，增大岩土容重，潜蚀岩土，对透水岩层产生浮托力等。尤其是对滑面（带）的软化作用和降低强度的作用最为突出^[25]。

地表水的冲刷作用可使河岸变高、变陡。水流冲刷坡脚，使滑动面临空或将趋于稳

定的老滑坡下部物质带走，导致滑坡体的复活。

6, 气象因素的影响

大气降水，特别是历时较长的强暴雨也是导致滑坡的主要因素。依据资料分析，大多数滑坡都发生在雨势高峰期后的 4h 之内，只有约 10%的滑坡发生在 16h 以后，而且通过对香港地区大量的滑坡事件统计发现，约 70mm/h 的降雨强度是引起滑坡的临界值，当每小时降雨强度大于该值时，滑坡的数量及其严重性将会激增^[26]。

大气降水引起的水位涨落也是诱发库岸滑坡的重要因素^[27,28]。地下水位上升，促使孔隙水压力提高，降低了抗滑力，从而也造成滑坡失稳；当地下水由滑坡岩土体中排出时，由于有一定的水力梯度，形成动水压力，增加了沿地下渗流方向的滑动力，对滑坡稳定性也是非常不利的。

人们已经对降雨诱发滑坡的单因素分析做了大量的工作^[29]，如当降雨时，地下水位上升造成滑体、滑带的岩土力学强度的降低和地下水位上升可引起滑体容重、孔隙水与动静水压力增加的规律，诱发或复活滑坡的降雨及其概率的理论与实例分析等。

7, 植被的影响

地表植被是自然生态环境的一部分，植被对滑坡的影响可以概括为水文地质效应和力学效应两个方面^[30]。例如：树木在水文地质效应方面可以遮挡降雨，减少降水入渗量，并且可以通过蒸发降低地下水位或疏干土体，树木还可以降低水的侵蚀能力；在力学效应方面，树木的根可以提高土体的抗剪强度。

2.3 路基沉陷

路基沉陷是土体因自重、外部荷载、浸水等作用产生固结变形，变形量超过允许值，固结沉降使病害体与周边土体之间形成裂缝。路基沉陷一般发生在填方路段或半填半挖路段的填方侧。

路基沉陷的主要表现形式为路基局部标高较周围低，路面出现大量的裂缝。大量的调查表明，路基沉陷是多方面因素综合作用的结果。可以归纳成以下几个影响因素：

1, 工程地质与地形

当工程地质条件不良，原地面比较软弱，特别是在泥沼地段、流沙和垃圾以及其它劣质土地段填筑路堤时，若填筑前未经换土或很好地压实，则填筑完成后，原地面土壤易产生压缩下沉或挤压位移造成路基沉陷。

当路堤穿过沟谷时，沟谷中心往往填土高度最大，向两端逐渐降低，在路堤横断面

上,往往迎水面填土高度小于背水面。这样也将由于填土高度不同而可能产生路基沉陷,使路堤纵断面方向路面中间低、两边高,横断面方向的路肩一侧高一侧低。

在我国西部地区,受地形条件限制,有大量的半填半挖路基以及陡坡路基,填土厚度不均,造成沉降差异,引起路基沉陷。

2.地下水的影响

路基或地基中地下水的动态特征对路基不均匀沉降影响很大。路堤和地基中地下水主要补给来源有三种类型,即降雨补给、地下水侧向补给、地表水侧向补给。其动态变化及潜蚀作用影响到土体中有效应力分布、土体的结构和土体强度,从而导致路基沉陷。

3.路基填方压实度不足

路基施工时,天气太干燥,局部路堤填料黏土土块粉碎不足,致使路基压实不均匀;暗埋式构造物因构造物长度限制使路基边缘不能超宽碾压,致使路基边缘压实度不够;有些超车道与行车道拼接段不同步施工,且拼接处理得不好;在填方路基施工中,当路堤施工到一定高度以后,路堤边缘土体往往存在压实度不足问题。这些情况都会导致路基沉陷的发生。

4.地基中存在软弱土层

软弱土层本身力学性能差,在一定厚度及附加应力作用下,会发生固结沉降、次固结沉降和侧向塑性挤出,导致明显的路基沉陷。在填筑前未经换土,或路堤填料选择不当,填筑方法不合理,压实度不足,不同土质的材质没有分层填筑而采用混合填筑,在荷载、水和温度综合作用下发生堤身沉陷。一般说来,土层的天然含水量越高、天然孔隙比越大,则压缩系数越大、承载力越低,则路基的沉陷量越大。软弱土层的厚度、填筑土层的高度和宽度越大,路基的沉陷越大。

有些路段所处地基不属于软土地基,但是处于丘陵洼地、河谷处,长期受水冲蚀,天然含水量较高,在设计时未发现或未作特别处理,在施工时也未作等载或超载预压,或者有些河谷、水塘虽作了清淤处理,但是处理不彻底或回填材料控制得不好,从而形成人为的相对软弱土层。在高填方后,地基出现不均匀沉降,造成路基沉陷。

5.新填筑路基下地基在自重压力或附加压力作用下沉陷

公路路基形式有填方路基、挖方路堑、半填半挖路基,填方路基又分为高填方路基和一般填方路基。但填土路基不论填筑高度的大小,其沉陷均由两部分组成:一是新填筑路基下老地基的沉陷;二是新填土的自沉。对大部分填方路基沉陷而言,第一部分沉陷是整个路基沉陷的主要原因。

6.填筑建筑物物质成分不均

在公路施工过程中，对填方物质的级配、成分很难做到有效的控制，填筑物常常是开挖路堑、施工产生的弃方。这些物质成分差异大、级配也相差很远。在施工过程中，如果分层碾压厚度过大，小颗粒物质和软弱物质很难得到有效压实，在荷载的长期作用下，回填物质会产生不协调沉降变形，从而引起路面沉陷。

第三章 公路路基地质灾害识别的原则及路基工程地质结构分析

3.1 公路路基地质灾害识别的原则

公路地质灾害识别原则是进行识别的指导思想，是选取地质灾害预判判据、地质灾害所处状态判据的基本准绳。识别原则的确定应是有目的，识别原则应与达到的目的相统一。因此，在考虑识别原则时，应详尽地分析公路地质灾害的特点和性质，既要尊重客观规律又要达到实践目的，将公路地质灾害特点规律和公路工程实践目的统一起来确定公路地质灾害识别的原则。

1,科学性与实用性原则

科学性是科学研究的根基，主要体现在识别的方法具有现代相关科学理论依据，适用性较好，易于推广；公路地质灾害诱发因素的准确可靠性及灾害识别的可操作性；实用性则主要体现在识别方法简单易行，易于为一般地质工程人员所掌握应用，并有助于灾害的判别，能为研究区地质灾害的预防和防治提供依据。

2,主导因素与综合因素相结合的原则

由于地质灾害的形成过程是极其复杂的，它受多种因素的影响，是各个因素综合作用的结果，因此，在进行灾害识别时，首先应进行综合分析，由于影响因素较多，因此应在综合分析各要素的基础上，分清主次，抓住能反映灾害特征的主导因素进行识别。

3,分阶段原则

任何自然现象都有其发生、发展、消亡的过程，地质灾害现象同样也是一个发展变化的过程，是动态的而不是静态的。分阶段对灾害进行识别研究，可有效的预防和治理，因为灾害在不同的发育阶段，预防和治理措施是不同的。

4,限制性原则

或称敏感因子原则。由于某一个或者某些要素（敏感因子）对灾害的产生起着至关重要的制约和限制作用，在进行公路地质灾害识别时，常常需要根据实际情况突出这些敏感因子的作用，即当这些敏感因子组合满足某种条件时，则无论其他因素条件状态如何，都倾向于判定该地质灾害危险性高。

5,发生学原则

地质灾害的发生取决于多种因素，而不同的灾害又有不同的发生机制。在进行地质灾害识别时，应注重公路地质灾害发展、演化历史过程中主要的、本质的、必然的因素。

6.定性和定量分析相结合原则

公路地质灾害识别技术是地质灾害防治的基础。由于自然环境因素的复杂性及灾害本身特征差异的模糊性，目前尚无法完全采用定量方法来反映，必须采用定性分析为基础，总结地质灾害发育规律、区分其相似性和差异性。然后采用定量方法来反映地质灾害与各种因素之间的关系，通过定性、定量相结合使识别的判据更好地反映实际情况。

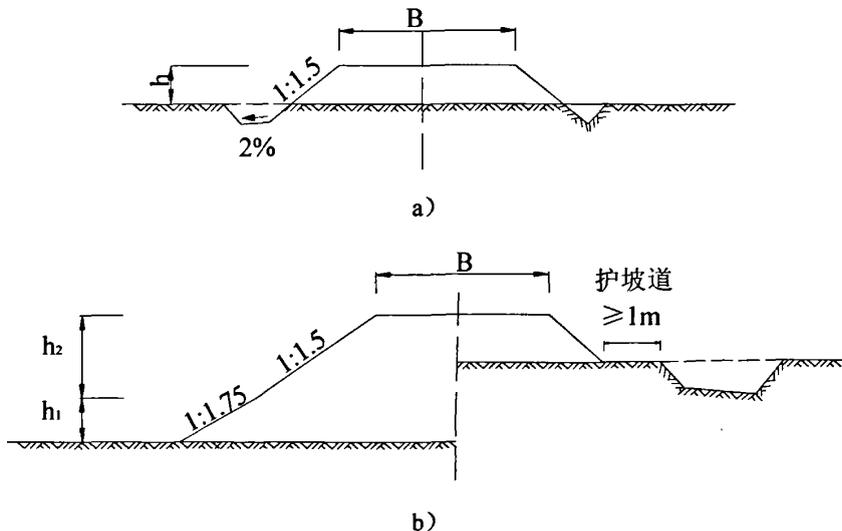
3.2 公路路基工程地质结构分析

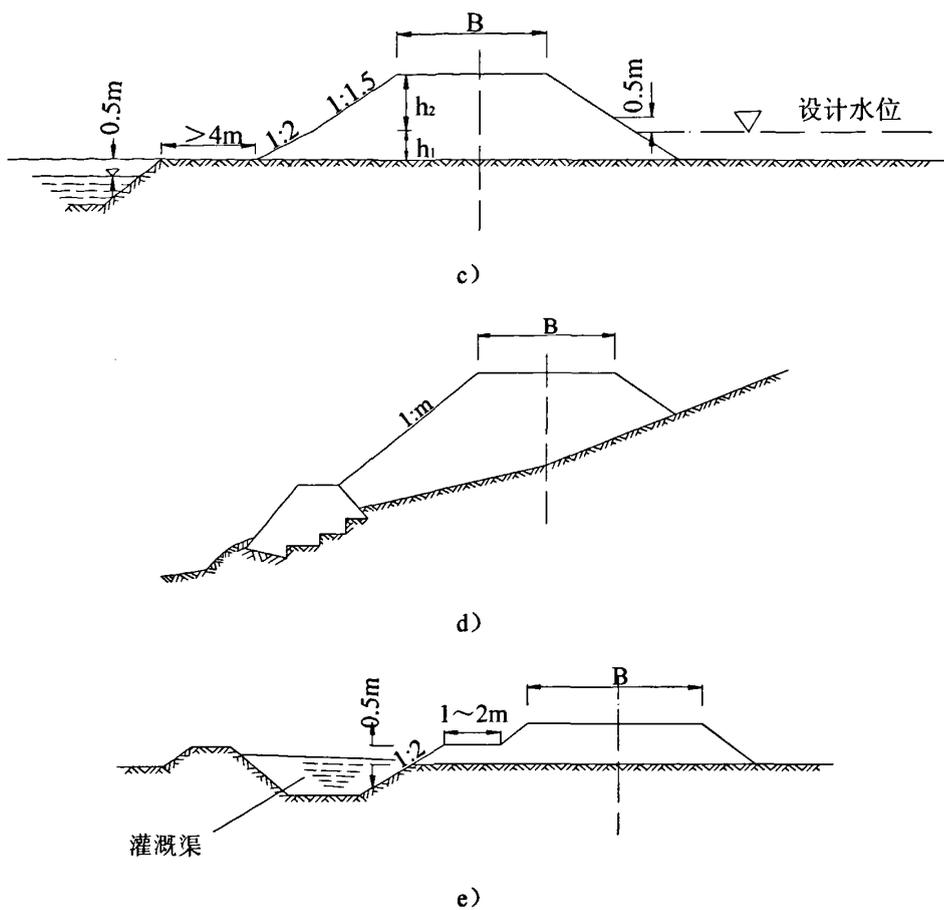
路基工程地质结构决定了破坏方式、破坏规模，也是病害治理措施选择的主要依据。路基工程地质结构是由外部形态、内部结构面以及路基岩土组合而成的系统。它主要由路基几何形态、内部结构面以及岩土体三个部分组成。

3.2.1 路基几何形态

路基几何形态包括两方面：路基断面类型和边坡形态类型。

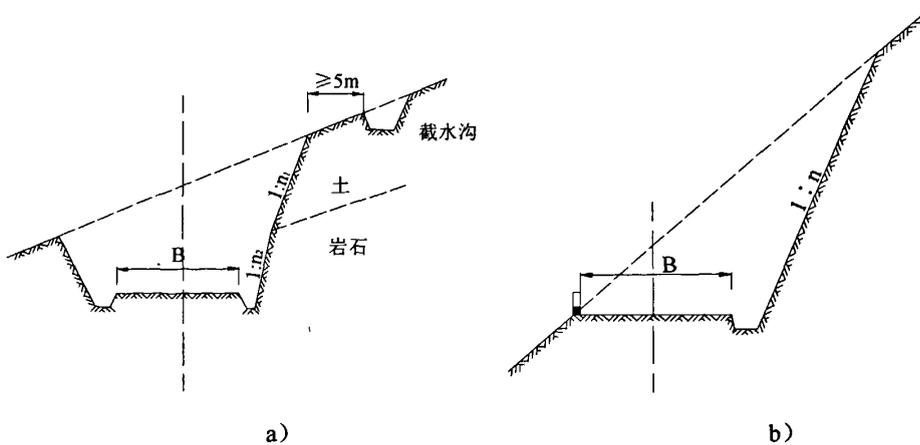
通常路基标高与天然地面标高是不同的，路基设计标高低于天然地面标高时，需进行开挖；路基设计标高高于天然地面标高时，需进行填筑。由于填挖情况不同，大致可分为路堤（填方路基）、路堑（挖方路基）和填挖结合三种路基类型（如图 3.1~3.3）^[31]。路堤是指全部用岩土填筑而成的路基。路堑是指全部在天然地面开挖而成的路基。当天然地面横坡大，且路基较宽，需要一侧开挖而另一侧填筑时，为填挖结合路基，也称为半填半挖路基。在丘陵或山区公路上，填挖结合是路基横断面的主要形式。

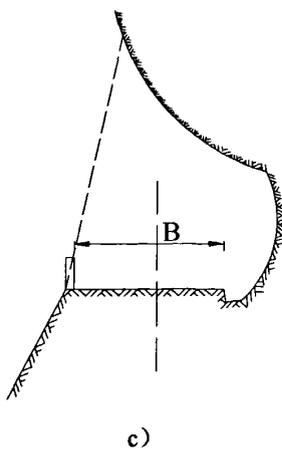




a)矮路堤;b)一般路堤;c)浸水路堤;d)护脚路堤;e)挖沟填筑路堤

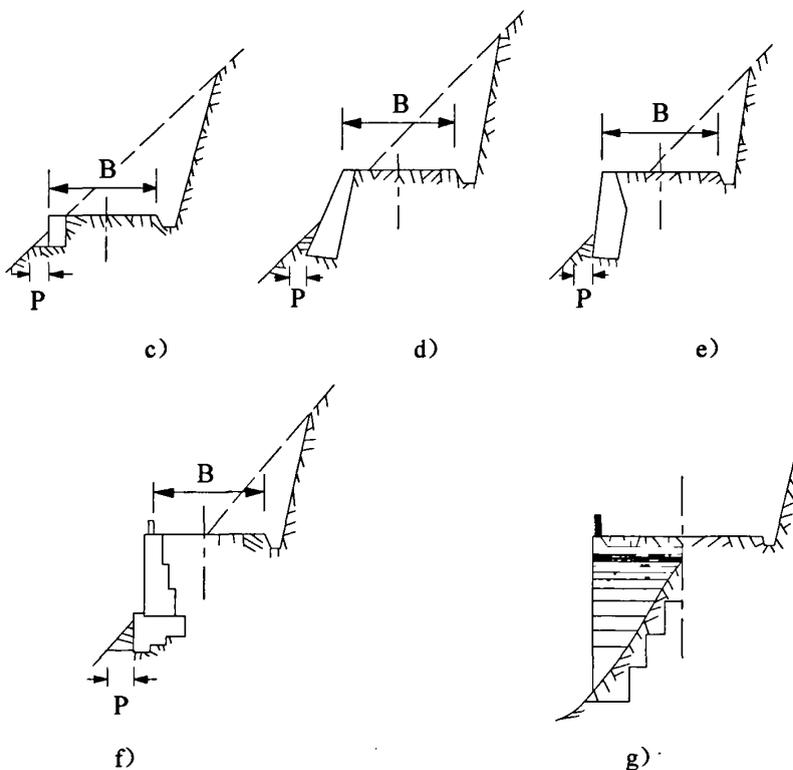
图 3.1 路堤的几种常用横断面形式





a)全挖路基;b)台口式路基;c)半山洞路基

图 3.2 路堑的几种常用横断面形式



a)一般填挖路基;b)矮挡土墙路基;c)护肩路基;d)砌石护坡路基;e)砌石护墙路基;f)挡土墙支撑路基;g)半山桥路基

图 3.3 半填半挖路基的几种常用横断面形式

路基边坡形态对公路灾害的发生也有着重要的影响。根据路基边坡的纵剖面形态（沿倾斜方向）可以将路基边坡分为：①凸形坡，上部坡度较小，下部较大，其稳定条

件主要取决于岩体结构，一旦发生变形，则会形成大规模的崩塌；②直线坡，上部和下部的坡度一样，野外见到的直线形边坡有三种情况，第一种是边坡岩性单一，这种边坡的稳定性一般较高。第二种是由单斜岩层构成的直线形边坡，其外形在山岭的两侧不对称，前坡由于地形陡峻，若岩层裂隙发育，风化强烈，则易发生崩塌现象，后坡则与岩层面一致，坡度均匀平缓，会因坡脚开挖失去支撑，在不利的岩性和水文地质条件下，很容易发生大规模的顺层滑坡。第三种是由于山体岩性松软或岩体破碎，当选作傍山公路的路基时，应注意挖方内侧的坍方和路基沿边坡滑坍；③凹形坡，上部坡度较大，下部的较小，凹形坡面往往是古滑坡的滑动面或崩塌体的依附面；④阶梯形坡，它有两种情况：一种是由软硬不同的水平岩层或微倾斜岩层组成的基岩边坡，由于软硬岩层的差异风化而形成阶梯状边坡外形，稳定性一般比较高；另一种是由滑坡台阶组成的次生阶梯状斜坡，如坡脚受到不合理的切坡或强烈冲刷，可能引起古滑坡复活，威胁公路安全。

3.2.2 路基内部结构面

路基范围内的结构面可以分为工程结构面和地质结构面两种。

1、工程结构面

工程结构面包括填挖交界面、填方与原地表接触面、不同填筑材料之间的过渡面或接触面、最危险破坏面、结构物与岩土接触面等。

2、地质结构面

地质结构具体可分为岩体结构和土体结构两个方面。

(一) 岩体结构

岩体结构在岩体的变形与破坏中起主要作用，大量的工程实践表明，岩体的滑移以及岩体的塌落大多数是沿着软弱结构面发生的。岩体的变形与破坏，主要取决于岩体内各种结构面的性质及其对岩体的切割程度。结构面是岩体中开裂的或易开裂的节理面、断层面、层间错动面、层面、片理面等的总称。这些结构面破坏着岩体的完整性，直接影响着路基工程结构的稳定性。

影响岩体稳定的软弱结构面有构造运动形成的不同性质的节理、劈理和断裂面；有变质作用形成的片理、片麻理；有沉积作用形成的层面、层理、假整合及不整合面等。按成因，结构面可分为原生结构面、构造结构面、次生结构面三大类，其主要特征见表 3.1^[32]。

表 3.1 岩体结构面类型及其特征

成因类型		地质类型	主要特征		
			产状	分布	性质
原生结构面	沉积结构面	1.层理、层面 2.软弱夹层 3.不整合面、假整合面、沉积间断面	一般与岩层产状一致,为层间结构面	海相岩层中此类结构面分布稳定,陆相岩层中呈交错状,易尖灭	层面、软弱夹层等结构面较为平整;不整合面及沉积间断面多由碎屑泥质物构成,且不平整
	岩浆结构面	1.侵入体与围岩接触面 2.岩脉岩墙接触面 3.原生冷凝节理	岩脉受构造结构面控制,而原生节理受岩体接触面控制	接触面延伸较远,比较稳定,而原生节理往往短小密集	与围岩的接触面,可具熔合及破坏两种不同的特征,原生节理一般为张裂面,较粗糙不平整
	变质结构面	1.片理 2.片岩软弱夹层	产状与岩层或构造方向一致	片理短小,分布极密,片岩软弱夹层延展较远,具固定层次	结构面光滑平直,片理在岩层深部往往闭合成隐蔽结构面,片岩、软弱夹层、片状矿物,呈鳞片状
构造结构面	1.节理(x形节理、张节理) 2.断层(冲断层,张性断层,横断层) 3.层间错动 4.羽状裂隙劈理	产状与构造线有一定关系,层间错动与岩层一致	张性断裂较短小,剪切断裂延展较远,压性断裂规模巨大,但有时为横断层切割成不连续状	张性断裂不平整,常具次生充填,呈锯齿状,剪切断裂较平直,具羽状裂隙,压性断层具多种构造岩,成带状分布,往往含断层泥、糜棱岩	
次生结构面	1.卸荷裂隙 2.风化裂隙 3.风化夹层 4.泥化夹层 5.次生夹泥层	受地形及原始结构面控制	分布上往往呈不连续状透镜体,延展性差,且主要在地表风化带内发育	一般为泥质物充填,水理性质很差	

(1) 沉积结构面

它是沉积岩在沉积、成岩过程中形成的结构面,包括层面、层理、原生软弱层、不整合面等,其中软弱夹层对岩体稳定性影响很大。

陆相沉积岩在沉积过程中往往发生沉积间断,在沉积间断期,岩层由于会遭受风化剥蚀,又被新的沉积物覆盖,从而会在不整合面上下两套岩层之间形成软弱夹层。在火山岩喷发间歇期,能形成风化夹层。一般胶结松散,含泥质物质较多,且多为地下水通道,易泥化或软化,强度较低。

原生软弱夹层一般为碳酸盐岩体中的钙质页岩、泥质灰岩夹层,碎屑岩类中的各类页岩夹层,泻湖相岩及陆相碎屑岩层中可溶盐类夹层等。它们大多数强度低、水稳性差。

(2) 岩浆结构面

它是岩浆侵入活动及冷凝过程中形成的结构面，包括岩浆岩与围岩的接触面、冷凝产生裂隙及侵入挤压破碎结构面等。

岩浆岩与围岩接触面，往往胶结不良，或形成小型破碎带。冷凝原生裂隙具张性破裂特征，一般粗糙不平。

(3) 变质结构面

它是受变质作用形成的结构面，如片岩软弱夹层、片理等。

绿泥石片岩、薄层云母片岩、滑石片岩等，由于片理发育，岩性软弱，矿物易风化，易形成软弱夹层。

片理在岩体深部往往闭合成隐蔽结构面。沿片理面一般片状矿物富集，对岩体强度起控制作用。

(4) 构造结构面

它是受构造应力作用产生的破碎带或破裂面。包括构造裂隙、层间错动面及断层等。其特点是延展性较强、分布有一定规律、规模较大，对岩体的稳定性影响大。其工程地质性质与力学成因、规模及次生变化等有密切关系。主要由构造应力场控制它们的产状和分布情况。

(5) 次生结构面

岩体受地下水、卸荷、风化等次生作用形成的结构面，如风化裂隙、卸荷裂隙、风化夹层、泥化夹层、次生夹泥层等。它们的产状及分布受地形影响较大，受河谷及岸坡岩体稳定影响较为显著，在路堑边坡工程中应特别注意。

地下水可以使软弱夹层泥化，同时也可以产生次生夹泥。泥化作用发育在粘土质页岩、粘土岩、泥质灰岩等隔水的软弱夹层顶部，其覆岩岩层往往比较坚硬、断裂发育、地下水循环剧烈。次生夹泥可沿裂隙、层面、断层形成，在地下水活动带内较为常见，主要是由地下水携带细粒泥质物重新沉积充填形成。

卸荷裂隙，当岩体受河流切割影响出现临空面时，由于调整岩体内产生的张应力及应力释放，导致岩体破裂，在块状脆性岩体中比较常见。它可受风化、重力等作用的影响而张开，甚至发生位移。

风化作用既能沿原结构面发育形成风化夹层，又能在岩体中形成风化裂隙。风化裂隙一般仅限于表层风化带内，短小密集，产状无规律。而风化夹层则可能延至岩体较深部位，如岩脉风化、断层风化、夹层风化等，其特征很大程度上取决于原结构面的特征。

结构面的特征:

①结构面的规模

结构面的延展性及规模对岩体力学性质及岩体稳定性起首要作用。中国科学院地质研究所将结构面的规模分为五级（见表 3.2）。

表 3.2 结构面规模分级

	特征
一级结构面	大断层, 区域性的断裂破碎带, 延展数千米, 破碎带的宽度从数米至数十米。
二级结构面	长宽不大的区域性地质界面, 如较大的断层、层间错动、不整合面、原生软弱夹层、沉积间断面等。其长度数百米至数千, 常控制山体稳定性, 影响工程布局。
三级结构面	几十米至数百米的断层、区域性节理、层面、层间错动, 控制工程岩体的破坏和滑移机理。
四级结构面	几十厘米到 20~30m, 是构造岩块的边界面, 破坏了岩体的完整性, 影响岩体的力学性质, 是结构面统计分析和模拟的对象。
五级结构面	数厘米到 30cm, 隐节理、微层理、微裂隙, 不发育的片理、劈理等微小裂隙, 又称微结构面。包含在岩块内, 主要影响岩块的物理力学性质。

在实际工程应用中, 应根据工程规模选择调查重点。路基工程一般注重对三级、四级结构面的调查。

②结构面的形态

自然界中结构面的几何形状大体可分为四种类型: 平直型、锯齿状型、波状起伏型、不规则型。

平直型: 包括大多数层面、片理和剪切破裂面等。

锯齿状型: 如多数张扭性和张性结构面。

波状起伏型: 如轻度揉曲的片理、波痕的层面、呈舒缓波状的压性及压扭性结构面等。

不规则型: 其结构面曲折不平, 如交错层、沉积间断面及沿原有裂隙发育的次生结构面等。

结构面的形态特征一般用起伏度和粗糙度来表征。结构面的起伏度和粗糙度对抗剪

强度影响很大。起伏度包括两个要素：起伏长度和起伏幅度。起伏幅度越大，长度越小，结构面抗剪强度越高，反之则低。粗糙度是指结构面粗糙程度，一般可将粗糙度分三级，即粗糙的、平滑的和镜面的。粗糙的结构面抗剪强度高，镜面的强度低，平滑的处于二者之间。

③结构面的物质构成

有些结构面物质软弱疏松，含水理性质不良的粘土矿物及泥质物，抗剪强度低，对岩体稳定性影响很大。如页岩夹层或粘土岩，假整合面及不整合面，风化夹层、断层夹泥、层间破碎夹层、泥化夹层及次生夹泥层等。

④延展性

结构面的延展性又称连续性，有些结构面延展性强，可在一定工程范围内切割整个岩体，对稳定性影响较大，同时也有一些结构面不连续或比较短小，岩体强度一部分仍为岩石强度控制，稳定性好。

⑤密集程度

结构面的密集程度反映了岩体的完整性，它决定岩体破坏和变形的力学机制。在岩体中，有时虽然结构面的规模和延展长度均较小，但却平行密集，或互相交织切割，使岩体稳定性大为降低。

⑥张开度和填充胶结特征

有些结构面，特别是张性断裂面，为地下水活动提供了条件，不仅降低了抗剪强度，而且能产生静、动水压力，影响斜坡岩体稳性。

胶结情况和充填物对岩体稳性影响显著。胶结后的结构面，力学性质有所改变，改善程度因胶结物成分而异。未胶结但有一定张开度的结构面，往往被外来物质所填充。其力学性质取决于充填物的成分、含水性、厚度等。

根据以上结构面类型和特征，可把岩体结构分为以下类型：

(1) 整体块状结构

岩性比较均一，结构面间距大于 50cm，含 2~3 组较发育的软弱面或无软弱面，含有的原生结构面结合力较强。如厚层或巨厚层的碳酸盐岩、碎屑岩等沉积岩、花岗岩、闪长岩等大型岩浆岩侵入体，原生节理不发育的安山岩、流纹岩、凝灰角砾岩、玄武岩等火山岩体以及某些石英岩、大理岩、蛇纹岩、片麻岩、混合岩等变质岩体属此类型。

(2) 层状结构

含一组软弱面的抗剪性能较低、连续性好，岩性不均一的岩体。按软弱面发育密度

可分为薄层状(间距小于 30cm)、层状(软弱面间距 30~50cm)。此类型岩体包含:中至薄层状的碎屑岩、碳酸盐等沉积岩,有明显间断或喷发旋回的玄武岩、流纹岩、火山集块岩、凝灰岩等火山岩,角闪石片岩、石英片岩、千枚岩等变质岩及含古风化夹层的岩体等。

(3) 碎裂结构

岩体被分割为碎块状,含有多组密集结构面的岩体。

(4) 散体结构

一般为强烈的风化带或构造破碎带中夹泥包块或泥的松软岩体,如碎屑、碎块等。

(二) 土体结构

土体的结构不仅包括土的微结构,又包括土体宏观结构。土的微结构指土体材料结构,即粒状结构、蜂窝状结构和棉絮状结构。土体结构指土体形成过程中伴随形成的相的特征,以及后期改造过程中产生的节理、裂缝等不连续面切割土体后的排列、组合特征。层理是土体的原生结构最重要标志,土体原生结构总共有三大类:

(1) 流水作用形成的层理;

(2) 风积所形成的均质结构;

(3) 残积、洪积、冰积形成的无序状土体结构。

流水作用形成的层理由于作用类型不同又可划分为若干亚类。如江、河流水作用形成的土体常含有透镜体,无论在纵剖面或横剖面上都不稳定,相变较大;冰水作用形成的土体层理较稳定;海、湖作用形成的层理比较平稳;坡积作用形成的土体多含夹层,相变较大;冰积、洪积、残积作用形成的土体颗粒分布杂乱无章,呈无序状结构。总的来说,土体的原生结构可以用堆积相来描述。层理面是堆积的不连续面,也是土体内物理力学性质的软弱面。由于堆积间断常在层理面形成粘土或淤泥类物质,是一个土体强度的弱面。因此,可以说土体中起控制作用的原生结构面有两个特性:一是在土体形成上是一个堆积间断面,二是在物理力学性质上是一个弱面,沿着这个面抗剪强度很低,容易发生滑动变形^[33]。

在工程上,应分清是哪种结构对工程的变形破坏起控制作用。

当土体的性质均一和规模较小时,土的结构可以代表土体的结构。如对于湿陷性的灵敏粘土、淤泥、马兰黄土、红粘土等,这些土的变形破坏主要受土的微结构控制或微结构的物理化学效应所控制。

例如,李同录教授在研究黄土滑坡勘察时,发现滑带土微观结构起控制性作用。

泾阳县太平镇庙店村的太平滑坡，滑坡塬边高差 85m，滑坡段宽约 150m，滑坡堆积体前缘距坡脚约 350m，堆积体形成坡状地形。整个滑坡堆积体表面发育大量划痕，形成 10~20cm 的剪切带。对滑带土样进行观察发现，100 倍的照片上可分辨出微小的孔洞，这些孔洞与原状黄土相比，明显经受过挤压变形，孔洞数量较少。在 200 倍的照片上粘土颗粒的轮廓能清楚地分辨出来，孔洞的结构显示很清楚，也清楚反应了滑动面上的微裂隙。把 500 倍的原状黄土和滑带黄土的照片放在一起比较，可看出，原状黄土具有大孔隙结构和团粒结构，结构极不均匀；而滑带土基本上看不出大孔结构和团粒结构，颗粒排列紧密，明显地受到过动力挤压。可见，滑带黄土在微观结构上具有明显的挤密特征^[34]。

均匀的砾质土和砂性土体结构，不仅包括了颗粒的级配和形状，又包括了颗粒的排列方式，不仅包括了粘土物质的含量，又包括了对骨架的充填胶结状况。

对于多种成因多层土层构成的复杂土体，不仅要研究某一层或某几层土层的微结构，更主要的是要研究由各种土层构成的土体的宏观结构，其土体的宏观结构不仅包括了土层组合又包括了土层间和土体与岩体间的界面特征、产状和相互关系；不仅包括了单一土层的透水含水特征又包括了含水层隔水层的空间分布和相互关系；不仅包括垂直剖面上各种土层的组合形式又包括了它们在水平方向上的性质变化。土体的宏观结构，尤其是各种不连续界面，对土体的破坏往往起控制作用^[35]。

膨胀土是以蒙脱石为主要粘土矿物组成的粘土，除了具有一般粘性土的微结构外，在土体中还存在着各种成因的裂隙，有光滑的膨胀裂隙、网状的收缩裂隙，有些情况下还存在古滑坡面和滑坡裂隙，以及层间软弱夹层等，这些结构面往往控制着路堑边坡的稳定性。由于大量蒙脱石的存在使其具有一系列的物理化学特性。天然埋藏的膨胀土富含吸附水，特别是层间吸附水的活性粘土，其天然含水量通常为 20~30%，边坡开挖后边坡表部土体在干旱季节遭受强烈的风干脱水，土体收缩并形成大量的收缩裂隙，向土体内部则脱水收缩程度明显减弱，因此它存在着风化影响深度问题，由于大量裂隙的存在，土的性质和结构强度与风化影响深度以外的土体具有显著的区别。

我国不少膨胀土边坡常为不同的膨胀土层或膨胀土与非膨胀土所构成的多层结构边坡，在不同土层之间或夹极薄软弱土层或呈光滑界面接触，这种软弱土层或界面的存在和与边坡坡向的关系，往往控制或导致边坡的破坏。

（三）岩质土质复合结构

以山坡中各种结构面的空间组合，以及与临空面的关系，并在大量调查统计的基础

上，以王恭先对坡体结构类型划分为基础，研究野外调研的大量工程实例，在总结分析这些工程实例病害类型及机理的基础上，归纳总结了以下结构类型（见表 3.3）：

表 3.3 路基岩土结构类型

路基岩土结构			
基本类型	亚类	基本类型	亚类
类均质结构	(a)粘性土结构	反倾层状结构 ($a > 10^\circ$)	(m)缓倾层状结构
	(b)黄土状土结构		(n)陡倾层状结构
	(c)风化残积土结构	碎裂状结构	(o)碎块状结构
	(d)堆填土结构		(p)碎裂状结构
近水平层状结构 ($a < 10^\circ$)	(e)河湖泊沉积层状结构	块状结构	(q)似层状结构
	(f)黄土软岩层状结构		(r)眼球状结构
	(g)软硬岩土结构	基座式结构	(s)上硬下软结构
	(h)厚层硬岩下伏软岩结构		(t)上软下硬结构
顺倾层状结构 ($a > 10^\circ$)	(i)黄土顺倾层状结构	岩堆体结构	(u) I 类岩堆
	(j)堆积层顺倾层状结构		(v) II 类岩堆
	(k)岩层缓倾层状结构		(w) III 类岩堆
	(l)岩层陡倾层状结构	黄土结构	(x)①类结构
反倾层状结构 ($a > 10^\circ$)	(m)缓倾层状结构		(y)②类结构

(1) 类均质体结构：指开挖基准面以上坡体物质成分基本相同、无明显的软弱带和各种结构面，坡体岩土体近平均质体，其变形破坏主要受坡体内应力分布和变化及土体强度的控制，如类均质黄土、均质粘性土、岩体的强风化残积层及人工堆填的类均质土坡等。此类结构的常见病害为局部的崩塌，同时受地下水作用，亦能形成大型坍塌或滑坡。

(2) 近水平层状结构：是指构成坡体的土层或岩层倾角都在 10° 以内，产状水平或接近水平。此结构易发生顺层滑坡。

(3) 顺倾层状结构：指构成坡体的土层或岩层层面向临空面且倾角 $> 10^\circ$ ，如斜坡上堆积的不同时期的黄土层、斜坡脚附近不同时期堆积的坡积、崩积、洪积层等，此类结构易发生顺层岩石滑坡。

(4) 反倾层状结构：指构成坡体的岩层层面向坡体内且倾角 $> 10^\circ$ 。此类结构易发生的破坏类型主要有错落、切层滑坡和崩塌、切层滑坡等。

(5) 碎裂状结构：指大的断层交汇带或断层破碎带的岩层形成的坡体，岩体成碎块状，在大断层带中又有许多派生的小规模错动带或断层，泥化成相对隔水层，强度较低，易形成滑动带。此类结构易发生的病害为大型崩塌、坍塌、滑坡。

(6) 块状结构：指块状火成岩，或厚层状的沉积岩、变质岩形成的坡体，岩体相对

完整，强度高。易沿结构面形成崩塌、滑坡灾害。

(7) 基座式坡体结构：指边坡体主要由两种性质差异明显的岩性组成，根据岩性的软硬差异可分为两类：

①上硬下软结构：此类结构坡体上部主要为厚层或巨厚层块状结构岩体，下部为一定厚度的软弱破碎岩体。易发生的病害为错落、挤出性滑坡、崩塌等。

②上软下硬结构：这种结构坡体上部主要是一定厚度的第四纪松散堆积体或软弱破碎岩体，下部由基岩或厚层、巨厚层块状结构岩体组成，且第四纪松散堆积体或软弱破碎岩体底部存在地下水和软弱带。这类结构的常见病害是软弱岩土沿下伏坚硬岩土层产生滑动或坍塌。

(8) 岩堆体结构：岩堆是指岩石碎块通过雨水作用或重力作用搬运至平缓山坡坡脚的疏松堆积物体。岩堆体一般呈碎裂、松散状，节理、裂隙发育，稳定性差。岩堆组成物质剖面结构一般有三种形式（如图 3.4）^[36]。

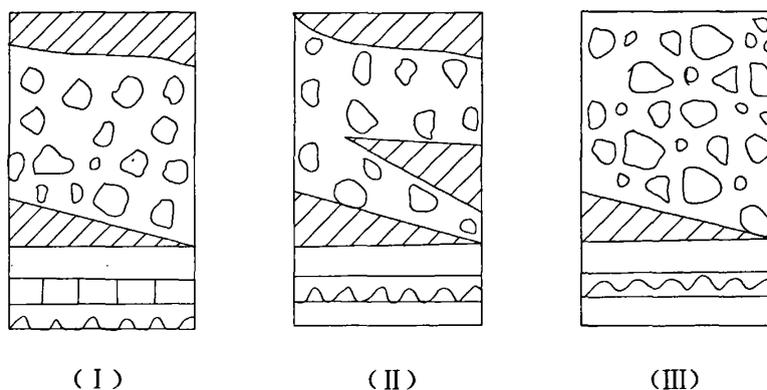


图 3.4 岩堆组成物质剖面结构

I 类岩堆体表层有 1~3m 粘性土覆盖，后缘山体稳定，植被发育，自然斜坡平缓，主要是岩屑及粘土质松散堆积于坡面上。此类岩堆基本不活动。

II 类岩堆体表层有零星粘性土覆盖，在块石土体中夹有 1~5m 粘性土透镜体，岩堆后缘斜坡一般较陡，在暴雨季节易出现坍塌、坠落等现象。

III 类岩堆体主要以块石、土直接堆积于下伏原始地面上，岩堆体上几乎无植被。后缘山体边坡甚陡，岩体节理十分发育，易形成崩塌灾害。

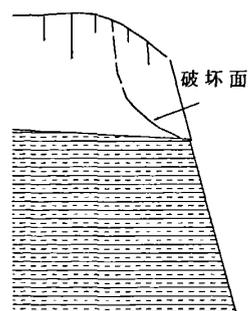


图 3.5 黄土破坏示意图

(9) 黄土结构:

①上部为黄土,下部为三趾马红土,不仅具有上软下硬、上部疏松易渗水、下部隔水的工程特性,而且在黄土与红土间往往存在影响黄土斜坡稳定性和滑坡发生顺坡向分布的松软泥质软弱带或岩土界面^[37]。

②上部黄土垂直节理裂隙发育,下部为近水平或外倾的基岩不整合接触面。在重力、地震、地下水的作用下,黄土底部发生错断、鼓胀,导致黄土边坡倾倒或滑塌(如图 3.5)。

3.2.3 岩土体的工程性质

1. 土体的工程特征

土质类型按形成条件和内部连结,可划分为:一般土和特殊土。

一般土的划分方法如下:

表 3.4 土质类型划分

土类	土组	粒度组成	塑性图
粗粒土	砾类土	砾粒 > 50%	
粗粒土	砂类土	砂粒 > 50%	
细粒土	粉性土	砂粒 < 50%	A 线以下
	粘性土	粘粒 > 10%	A 线以上

除了考虑土体粒度组成分类外,还要考虑土的赋存条件,如稠度状态、饱和度、冻胀性、胀缩性等。

(1) 砾类土

砾类土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量占 50%以上的土。砾类土颗粒粗大,孔隙大,透水性强,主要由石英或长石、岩石碎屑等原生矿物组成,呈单粒结构,内摩擦角大,压缩性低,抗剪强度大。流水沉积形成的砾类土,分选好,孔隙中充填物以砂粒为主,且数量较少,故透水性强,压缩性低,抗剪强度大。而基岩风化残积、冰川堆积及山坡堆积形成的砾类土,分布不均,产状复杂,分选差,充填大量细小颗粒(砂粒、粘粒、粉粒),其工程性质介于粘性土和砾类土之间,内摩擦角较小,透水性相对较弱,压缩性较大,抗剪强度较低。

总之,砾类土是良好的地基或路基填料。但当地下水位较高时,开挖基坑或路堑时易出现大量涌水,并伴有边坡失稳现象。

(2) 砂类土

砂类土是指粗粒(大于 0.075mm)含量占 50%以上,而且砾粒含量小于 50%,粘粒含量极少、以砂粒为主的土。其塑性极低或无塑性($I_p < 3$)。

砂粒的矿物成分以长石、石英及云母等原生残余矿物为主，粘粒含量很少且对土的性质没有大的影响。砂类土呈单粒结构，一般都没有连结，透水性强，压缩过程快，压缩性低，内摩擦角较大，承载力高。其工程性质与砂粒密实度和大小有关。中砂以上的粗粒砂类土可作为良好的地基，也是良好的混凝土骨料，但粉砂土、细砂的工程性质较差，含水丰富时存在振动液化问题，开挖容易形成涌水、流砂现象。

(3) 粉性土

粉性土是指粗粒（大于 0.075mm）含量小于 50%，塑性指数 $I_p < 10$ 的土。粉性土的性质介于砂类土和粘性土之间，它是二者的过渡类型。粉性土的透水性较差，抗剪强度小，抗水流冲刷能力差，不易压实，易出现液化、流砂等现象。

(4) 粘性土

粗粒（大于 0.075mm）含量少于 25%，粘粒含量较多，塑性指数 $I_p \geq 10$ 的土称为粘性土。粘性土含较多亲水性的粘土矿物，具有结合水连结和团聚结构，有时有胶结连结，孔隙小而多。粘性土随含水率的增加，土表现出固态、塑态、流态等不同稠度状态。水分的增减会引起体积的膨胀和收缩。压缩量大而且缓慢，抗剪强度主要取决于内聚力 C ，内摩擦角较小。

粘性土的性质主要取决于连结和密实度，与粘粒含量、稠度状态、孔隙比有关。随着粘粒含量的增多，粘性土的塑性、膨缩性、透水性、压缩性、抗剪性等有明显变化。

稠度状态适宜的粘性土是良好的路基填土材料。欠固结或含水量较大的粘性土易引起路基不均匀沉降、边坡变形失稳等病害。

特殊土主要包括黄土、膨胀土、软土、盐渍土、红土及冻土。

黄土的工程性质：

(1) 黄土的粒度成分 黄土的粒度成分以粉粒为主，约占 60%~70%，其次是砂粒和粘粒，各占 1%~29%和 8%~26%。在黄土分布地区，黄土的粒度有明显的变化规律，陇西和陕北地区黄土的砂粒含量大于粘粒，而豫西地区粘粒含量大于砂粒，即由西北向东南，砂粒减少，粘粒增多。一般认为，粘粒含量大于 20%的黄土，湿陷性减小或无湿陷性。这与粘粒在土中赋予状态有关，均匀分布在土骨架中的颗粒，起胶结作用，湿陷性小；呈团粒状分布的粘粒，在骨架中不起胶结作用，就有湿陷性。

(2) 黄土的相对密度和密度 黄土的相对密度一般在 2.54~2.84 之间，与黄土的矿物成分及其含量多少有关，砂粒含量高的黄土相对密度低，约在 2.69 以下，粘粒含量高的相对密度大，约在 2.72 以上。

黄土结构疏松，具有大孔隙，密度较低，约为 $1.5\sim 1.8\text{g/cm}^3$ ，干密度约为 $1.3\sim 1.6\text{g/cm}^3$ 。干密度反映土的密实程度，一般认干密度小于 1.5g/cm^3 的黄土具有湿陷性。

(3) 黄土的含水量 黄土含水量与当年降水量及地下水埋深有关，位于干旱、半干旱地区的黄土一般含水量较低，当地下水埋藏较浅时含水量就高一些。含水量与湿陷性有一定关系，含水量低，湿陷性强，含水量增加，湿陷性减弱，一般含水量超过 25% 时的黄土不具有湿陷性。

(4) 黄土的压缩性 土的压缩性由压缩系数表示，是指在单位压力作用下土的孔隙比减少。黄土虽然就有大孔隙，结构疏松，但压缩性中等，只有近堆积的黄土是高压缩性的，年代越老的黄土压缩性越小。

(5) 黄土的抗剪强度 一般黄土的内摩擦角 $\varphi=15^\circ\sim 25^\circ$ ，粘聚力 $c=30\sim 40\text{KPa}$ ，抗剪强度中等。干燥状态下黄土的工程力学性质并不是很差，但遇水软化甚至发生湿陷后，常引起工程的破坏，所以湿陷性是黄土最不良的性质。

(6) 黄土的湿陷性和黄土陷穴 天然黄土在一定的压力作用下，浸水后产生突然下沉现象，称为湿陷。黄土湿陷发生在一定的压力下，这个压力称为湿陷起始压力，当黄土受到压力小于起始压力时，不产生湿陷。

膨胀土的工程性质：

(1) 膨胀土的粒度成分以粘粒含量为主，高达 50% 以上，粘粒粒径小于 0.002mm ，接近胶体颗粒，为准胶体颗粒，比表面积大，颗粒表面由具有游离价的原子或离子组成，即具有较大的表面能，在水溶液中吸收极性水分子和水中离子，呈现出强亲水性。

(2) 天然状态下，膨胀土结构紧密、孔隙比小，干密度达 $1.6\sim 1.8\text{g/cm}^3$ ，塑性指数为 $18\sim 23$ ，膨胀土的天然含水量与塑限比较接近，一般为 $18\%\sim 26\%$ ，土体处于坚硬或硬塑状态，常被误认为是良好的天然地基。

(3) 膨胀土中裂隙十分发育，是区别其它土的显著标志。膨胀土的裂隙按成因有原生和次生之别。原生裂隙多闭合，裂面光滑，常有蜡状光泽，暴露在地表后受风化影响裂面张开，次生裂隙多以风化裂隙为主，在水的淋滤作用下，裂面附近蒙脱石含量明显增多，呈白色，构成膨胀土的软弱面，是引起膨胀土边坡滑坡的主要原因。

(4) 天然状态下，膨胀土的剪切强度、弹性模量都比较高，但遇水后强度降低，凝聚力小于 100KPa ，内摩擦角小于 10° ，有的甚至接近饱和淤泥的强度。

(5) 膨胀土具有超固结性。所谓超固结性是指在膨胀土受到的应力史中，曾受到比

现在土的上覆自重压力更大的压力，因而孔隙比小，压缩性低。

软土的工程性质：

(1) 软土的孔隙比和含水量 软土多在静水或缓慢流水中沉积，颗粒分散性高，联结弱，具有较大的孔隙比和高含水量，孔隙比一般大于 1.0，高的可达 5.8(滇池淤泥)，含水量大于液限达 50%~70%，最大可达 300%。但随沉积年代的久远和深度的加大，孔隙比和含水量降低。

(2) 软土的透水性和压缩性 软土孔隙比大，但孔隙小，粘粒的吸水、亲水性强，土中有机质多，分解的气体封闭在孔隙中，使土的透水性差，一般渗透系数 K 小于 10^{-6}cm/s ，在荷载作用下排水不畅，固结慢，压缩性高，压缩过程长，开始时压缩下沉很慢，完成下沉的时间很长。

(3) 软土的强度 软土的强度低，无侧限抗压强度为 10~40KPa。所以评价软土抗剪强度时，应根据建筑物加荷情况选用不同的试验方法。

(4) 软土的触变性 软土受到振动，海绵状结构受到破坏，土体强度降低，甚至成流动状态，称为触变，也称振动液化。触变使地基土大面积失效，对建筑物破坏极大。一般认为，触变是由于吸附在土颗粒周围的水分子的定向排列受扰动破坏，土粒好像悬浮在水中，出现流动状态，因而强度降低。静置一段时间，土粒与分子相互作用，重新恢复定向排列，结构恢复，土的强度亦逐渐提高。

(5) 软土的流变性 软土在长期荷载作用下，变形可以延续很长时间，最终引起破坏，这种性质称为流变性。破坏时软土的强度远低于常规试验测得的标准强度，一些软土的长期强度只有标准强度的 40%~80%。但是，软土的流变发生在一定荷载下，小于该荷载，不产生流变，不同的软土产生流变的荷载值也不同。

盐渍土的工程性质：

(1) 盐结晶的膨胀性(盐胀性)

硫酸盐沉淀结晶时，体积增大，脱水时体积减小。干旱地区日温差较大。由于温度的变化，硫酸盐的体积时缩时胀，致使土体结构疏松。在冬季温度下降幅度较大，便产生大量的结晶，使土体剧烈膨胀。一般认为含盐量在 2%以下时，膨胀带来的危害较小，高于这个含量则膨胀量显著增大。

(2) 盐渍土的力学性质

在一定含水量的条件下，因土粒中含有盐分，使土粒间的距离增大，而内聚力及内摩擦角则随之减小，土体的强度降低，因此，土在潮湿状态时，土中的含盐量越大，则

土的强度越低,当含盐量增加到某一程度后,盐分能起胶结作用时,或土中含水量减小,盐分开始结晶,晶体充填于土孔隙中起骨架作用时。则土的内聚力及内摩擦角增大,其强度反而比不含盐的同类土的强度高。因此盐渍土的强度与土的含水量关系密切,含水量较低且含盐量较高时,土的强度较高,反之较低。

(3) 盐渍土的湿陷性和水稳性

盐渍土不仅遇水发生膨胀,易溶盐遇水还会发生溶解,地基也会因溶蚀作用而下陷。有些地区盐渍土的结构与黄土类似,其粉粒含量 $>45\%$,孔隙度 $>45\%$,有一定的湿陷性。水对盐渍土的稳定性的影响很大,在潮湿的情况下,一般均表现为吸湿软化,使稳定性降低。

(4) 盐渍土的压实性

当土中的含盐量增大时,其最佳密度逐渐减小,当含盐量超过一定限度时,就不易达到规定的标准密度。如果需要以含盐量较高的土作为填料,就需要加大夯实能量。硫酸盐渍土的含盐量增加到接近 2% 时,碳酸盐渍土的含盐量超过 0.5% 时,土的密度显著降低。氯盐渍土中的盐类晶体填充在土的孔隙中,能使土的密度增大,但当土湿化后,盐类溶解,土的强度降低。

(5) 盐渍土中的有害毛细水作用

盐渍土中的毛细水上升能直接引起地基土的浸湿软化和次生盐渍化,进而使土的强度降低,产生盐胀、冻胀等病害。影响毛细水上升高度和上升速度的因素,主要是土的粒度成分、土的矿物成分、土颗粒的排列和孔隙的大小以及水溶液的成分、浓度、温度等;土的粒度成分对毛细水上升高度的影响最为显著,一般来说,颗粒越细上升高度愈高。盐分含量对毛细水上升高度也有影响,主要因素是盐的含量和盐的类型。

红土的工程性质:

(1) 液限较高,含水较多,饱和度常大于 80% ,土常处于硬塑至可塑状态。

(2) 孔隙比变化范围大,一般孔隙比较大,尤其是残积红土,孔隙比常超过 0.9 ,甚至达 2.0 。先期固结压力和超固结比很大,除少数软塑状态红土外,均为超固结土,这与游离氧化物胶结有关。一般常具有中等偏低的压缩性。

(3) 强度变化范围大,一般较高,粘聚力一般为 $10\sim 60\text{KPa}$,内摩擦角为 $10^\circ\sim 30^\circ$ 或更大。

(4) 膨胀性极弱,但某些土具有一定的压缩性,这与红土的粒度、矿物、胶结物等情况有关。

(5) 浸水后强度一般降低, 部分含粗粒较多的红土, 湿化崩解明显。

冻土的工程性质:

(1) 物理及水理性质 由多年冻土的组成可知, 土中水分既包括冰也包括未冻水。因此, 在评价土的工程性质时, 必须测定天然冻土结构下土的容重、相对密度、总含水量和相对含水量四个指标。

(2) 力学性质 冻土的强度和变形仍可用抗压强度、抗剪强度和压缩系数表示。但是由于冻土中冰的存在, 使冻土力学性质随温度和加载时间而变化的敏感性大大增加。在长期荷载作用下, 冻土强度明显衰减, 变形明显增大。温度降低时, 土中未冻土减少, 含冰量增大, 冻土类似岩石, 短期荷载下强度大增, 变形可忽略不计。

总之, 不同的土具有不同的工程地质性质, 在研究路基工程地质结构时, 首先需要确定土的类型, 从而预测可能出现的工程地质问题、提出改良方案, 为灾害防治提供必要的依据。

2. 岩石的特征

岩石是在地质作用下产生的, 由一种或多种矿物以一定的规律组成的自然集合体。它是内外动力地质作用的产物, 是人类工程活动的基本载体和环境。

自然界有各种各样的岩石, 按成因, 可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三类^[38]。

(1) 岩浆岩

岩浆冷凝固化后形成的岩石称为岩浆岩。组成岩浆岩的化学成分比较复杂, 地壳中的各种化学元素在岩浆岩中均能找到, 多以各种氧化物的形式出现, 其中 SiO_2 的含量最大, 由此可见岩浆岩是一种硅酸盐岩石。根据 SiO_2 含量大小, 可以分为超基性岩类(含 $\text{SiO}_2 < 45\%$)、基性岩类(含 $\text{SiO}_2 45\% \sim 52\%$)、中性岩类(含 $\text{SiO}_2 52\% \sim 65\%$)、酸性岩类(含 $\text{SiO}_2 > 65\%$) 四大类, 按岩石成因把每类岩石分为深成岩、浅成岩和喷出岩等不同类型, 见表 3.5。

表 3.5 岩浆岩分类表

岩石类型	酸性	中性		基性	超基性
SiO_2 含量(%)	>65	65~52		52~45	<45
颜色	浅色(灰白、浅红、褐黄等) → 深色(深灰、黑、暗绿等)				
矿物成分	正长石、石英、云母、角闪石	正长石、黑云母、角闪石、辉石	斜长石、黑云母、角闪石、辉石	斜长石、角闪石、辉石、橄榄石	辉石、橄榄石

表 3.5 岩浆岩分类表 (续)

岩石类型		酸性	中性		基性	超基性
成因 环境	喷出岩	玻璃状或碎屑状:浮石、火山凝灰岩、火山碎屑岩、火山玻璃				
		流纹岩	粗面岩	安山岩	玄武岩	未遇到
	浅成岩	花岗斑岩	正长斑岩	玢岩	辉绿岩	未遇到
	深成岩	花岗岩	正长岩	闪长岩	辉长岩	橄榄岩、辉岩

深成岩岩体呈整体状或块状结构,且多为巨大的侵入体,岩性比较均一,岩石结构多为中粗粒结构,颗粒比较均匀,致密且坚硬,力学性质好,强度高,孔隙率低,工程地质性质良好。浅成岩均一性较差,岩石多为斑状结构,抗风化能力很强,力学性质较好。喷出岩结构复杂,均一性差,各向异性显著,软弱夹层发育,杏仁构造、气孔构造或流动构造及原生节理较发育,岩体力学性质变差。

(2) 沉积岩

沉积岩是地表及以下不太深的地方形成的地质体,由生物作用、火山作用和风化作用等形成的产物经搬运、沉积作用所形成的松散堆积物,压实、胶结作用下形成的一种层状岩石。

沉积岩的组成物质,主要由碎屑物质、造岩矿物和溶解物质等组成。沉积岩的主要构造是层理构造。常见沉积岩的结构有泥质结构、碎屑结构、生物结构和晶粒结构。

根据组成沉积岩的物质成分和结构特征,可将沉积岩分为黏土岩、碎屑岩、化学岩和生物化学岩,见表 3.6。

表 3.6 沉积岩分类简表

岩类		沉积作用	主要岩石
碎屑岩	沉积碎屑岩亚类	机械沉积	砾岩、角砾岩 砂岩 粉砂岩
	火山碎屑岩亚类	机械沉积	火山角砾岩
粘土岩		机械沉积 胶体沉积	凝灰岩 泥岩、页岩
化学岩 生物化学岩		化学沉淀 生物遗体堆积	灰岩、白云岩 石膏、岩盐 煤、油页岩

(3) 变质岩

变质岩是由岩浆岩、沉积岩和变质岩在地壳中受到高压、高温及化学成分的影响,在固体状态下发生结构构造和矿物成分变化后形成的岩石。

变质岩的组成矿物种类很多。一部分与原岩相同,如沉积岩和岩浆岩中的石英、长石、方解石、云母等;另一部分是由变质过程所产生的,在变质岩中才会出现的矿物,

如滑石、石墨、绢云母等。只有在特定环境下才会产生变质矿物，是工程中鉴别变质岩的重要标志。常见变质岩构造有块状构造和片理构造，片理构造又可细分为千枚状构造、板状构造、片状构造和片麻状构造。变质岩的结构有三种：变晶结构、变余结构和碎裂结构。

变质岩的类型通常是按照变质岩特有的构造特征来划分的，如具有片状构造的称片岩，具有片麻状构造的称为片麻岩，具有板状构造和千枚状构造的分别称为板岩和千枚岩等，见表 3.7。

表 3.7 主要变质岩分类简表

变质作用	构造	岩石名称
区域变质作用	片麻状构造	片麻岩
	片状构造	片岩
	千枚状构造	千枚岩
	板状构造	板岩
区域变质作用 接触变质作用	块状构造	大理岩 石英岩
动力变质作用	块状构造	碎裂岩、糜棱岩

区域变质岩厚度大，变质程度在一定范围内比较均一，分布范围较广。接触变质岩出现在围岩与岩浆岩的接触部位，接触变质岩的范围和性质取决于岩浆侵入体的围岩性质、大小和类型。动力变质岩的裂隙发育，构造破碎、胶结不良，岩体呈散体结构或碎裂结构。

以上对岩石的分类是按成因分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类，这种分类方法便于学习和掌握三大类岩石的特征。但在路基灾害识别中作为路基工程的一部分，仅考虑其成因类型是不够的，还必须根据其强度进行工程分类，见表 3.8。

表 3.8 岩石等级划分

岩石类别		R_b (MPa)	代表性岩石
硬质岩石	坚硬岩	>60	1.花岗岩、闪长岩、玄武岩等岩浆岩类； 2.硅质、钙质胶结的砾岩及砂岩、石灰岩、泥质灰岩、白云岩等沉积岩类； 3.片麻岩、石英岩、大理岩、板岩、片岩等变质岩类。
	次坚硬岩	30~60	
软质岩石	软质岩	5~30	
	极软岩	≤5	

表注：1. R_b 为饱和单轴极限抗压强度；

2. 试块直径为 7~10cm，试块高度与直径相等。

关于硬质岩石和软质岩石的划分虽然是由抗压强度决定的，但岩石强度的高低与它自身物性特征是分不开的。硬质岩石的颗粒之间由于相邻的矿物颗粒上的原子或离子互相吸引，有着坚强的连结，这种连结就像晶体内相邻部分之间的连结那样牢固，这种连结关系称为“硬连结”或“结晶连结”，因此，硬质岩石具有高的抗水性和力学强度。

对于极软岩石，往往具有某些特殊性质，如泥灰岩，页岩等可被压缩，粘土岩具软化性，盐岩、石膏等具有可溶性。这一类岩石不仅抗水性差，而且强度也低，长期在水的作用下，这类岩石内部的连结力就会降低甚至失去。

3.2.4 路基工程地质结构

路基工程地质结构是由路基几何形态、内部结构面以及路基岩土体联合组合而成的系统（见图 3.6）。路基工程地质结构是路基范围内岩土体的分布和排列顺序、位置、产状、结构及其与路基外部形态之间的关系，其构成路基灾害的地质基础。

路基工程地质结构类型对路基稳定性有着很大的影响，块状结构类型的岩体当不存在“软弱面”时，一般不会形成滑坡，多发崩塌。而层状结构类型的岩体，层面的倾向对滑坡的发生有很重要的影响，当层面和斜坡的方向一致，倾角缓于斜坡坡角时，则极易产生滑坡。对于碎裂结构类型的岩体来说，当其中发育有顺坡向的断层或节理时，则易沿着断层或节理发生滑坡，不存在断层和节理时，将和散体结构类型的土体一样，由于强度较低，易于产生圆弧状滑面的滑坡。

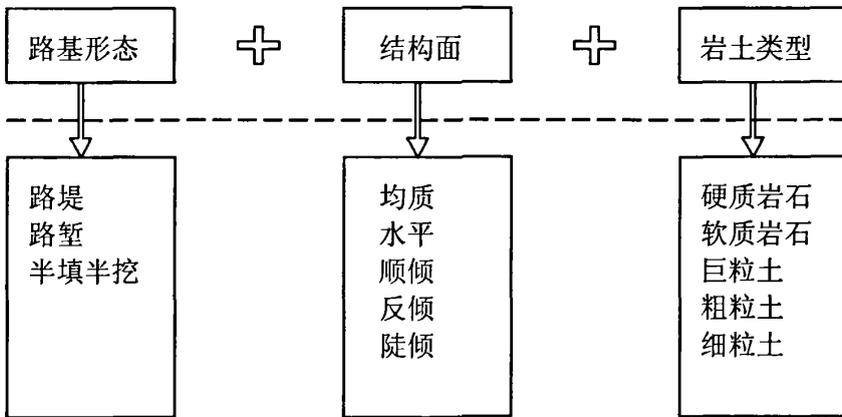


图 3.6 路基工程地质结构框图

由图 3.6 可见，路基工程地质结构的种类至少有 $3 \times 5 \times 5 = 75$ 种，因为还有几组结构面和几种岩土的组合没有罗列出。路基工程地质结构复杂、种类多，是灾害识别中一项非常艰巨的工作。

由于路基工程地质结构控制了灾害发生的类型，因此必须查明灾害形成的内部结构，为灾害的识别、评价以及防护工程的设计提供依据。通过调查、勘察，运用地质分析的方法，弄清路基的工程地质结构及其与灾害的因果关系，才能准确对路基病害或灾害进行调查判断、评价及治理，并结合环境影响因素，评价其规模、危害程度，选择经济合理处治方案。

第四章 公路路基地质灾害识别方法研究

公路路基地质灾害识别方法包含灾害预判和灾害识别两部分。地质灾害预判主要是依据地质地貌形态、灾害特征及一些地表和建筑物的变形和破坏迹象,判断路基地质灾害的具体类型。这一判断虽是初步的,但对相继开展的灾害识别、勘察和施工等有非常重要的意义。而灾害识别是通过识别指标的选取达到对灾害危险性判断的目的,为路基灾害的预防和防治服务。

4.1 灾害预判方法

路基地质灾害预判方法是通过对路基地质灾害的大量调查和研究,对灾害特征和影响因素的深入分析,首先根据路基断面类型对路基灾害可能发生位置进行判定,然后根据路基工程地质结构,对路基可能发生的破坏型式做出初步的判定,最后再根据路基灾害的特征进行具体的判别,以达到对灾害的超前预判,为后面灾害识别奠定基础。

4.1.1 灾害初判

大量资料分析表明,路基工程地质结构对路基地质灾害的影响比较大,路基工程地质结构形式不同,变形破坏机制也不同。路基工程地质结构对灾害的发生具有控制性作用,它决定了灾害的类型。依据路基工程地质结构,可以对路基边坡的类属迅速予以辨认,从而能较快掌握此类路基边坡的主要特征;可为路基病害的防治技术研究提供破坏机理、破坏模式等方面的信息,是重要的基础理论研究,也是路基边坡稳定性分析与评价的基础。只有正确认识路基工程地质结构才能准确的判定路基地质灾害。

野外调研发现,路基断面类型不相同,路基发生破坏的部位和方式也不相同,表 4.1 中列举了部分路基类型的破坏形式。

表 4.1 路基型式与破坏模式

路基断面类型	破坏形式
路堑	从坡脚剪出破坏 从半坡剪出破坏 崩塌
台口式挖方路基	上边坡滑动破坏 上边坡崩塌破坏 下边坡滑坡
半填半挖路基	上边坡滑动破坏 上边坡崩塌破坏 下边坡滑坡
路堤	路堤不均匀沉降 路堤边坡侧向滑移

岩土体的工程性质决定了路基地质灾害的分布、发生规模以及破坏形式，是地质灾害发生、发展的内在因素。因此，是路基地质灾害初判中必不可少的部分。不同的岩性，其性质差别很大，潜在的地质灾害问题也有很大的差别。不同的地层岩性存在不同地质工程问题，例如软土地基存在沉降变形问题、黄土具有湿陷性问题等。

这里所讲的工程性质主要是指岩体的强度性质，是考虑岩性、风化程度等影响的岩土体的坚硬程度。不同岩性组合控制了路基边坡岩体的变形破坏方式，例如路基边坡是由坚硬而脆性大的岩石构成，如果构造节理发育，常发生崩塌灾害。在相同高度和坡度的情况下，软岩虽然比硬岩强度低，但由于易于风化，产生崩塌的可能性也比较大。如果路基边坡是由软、硬岩石互层构成的陡峻斜坡，由于差异风化作用会造成坡面凹凸不平，也易发生崩塌灾害。岩体强度不仅能在一定程度上影响开挖边坡的稳定坡角，岩体强度越高，边坡的稳定坡角越大，反之越小，而且能在一定程度上影响结构面特性，如若软质岩受风化作用强烈，岩体中结构面物理力学性质就会很差，潜在不稳定岩体强度就会越低，坡体产生局部破坏导致整体变形失稳的可能性也就越大。

路基内部结构是路基范围内岩土体的分布和排列顺序、位置、产状及其与临空面之间的关系，其构成了路基灾害的地质基础。路基内部结构是路基工程活动影响范围内岩体的地质结构面和岩土结构体以不同的形式相互组合。路基内部结构不同，发生的灾害也不相同。例如：由软硬相间、互层或间层状的砂泥岩或其他岩类组成的岩质顺倾层状结构，岩层倾角一般在 $10\sim 30^\circ$ ，岩层倾向临空，可能发生顺层滑坡灾害（见图4.1）。

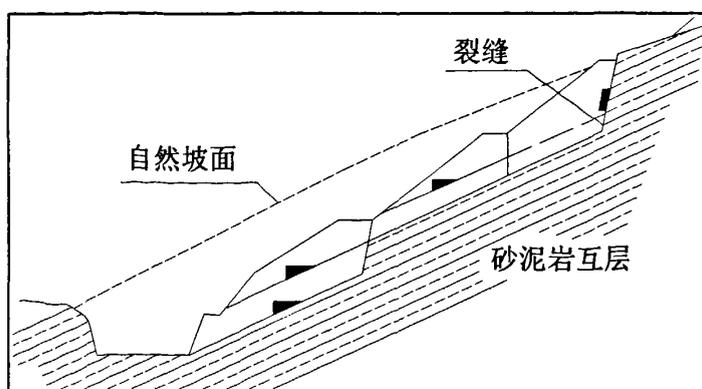


图 4.1 岩质顺倾层状结构

4.1.2 灾害预判

1. 滑坡预判

研究滑坡灾害时，滑坡的外部形态特征提供了预判滑坡存在的可能性。

在一个典型的滑坡体上，一般有以下外表形态：滑坡体，滑坡周界，滑坡壁，滑动面、滑动带和滑动擦痕，滑坡床，滑坡剪出口，滑坡舌与滑坡鼓丘，滑坡台阶和滑坡平台，滑坡前缘，滑坡后缘，滑坡洼地和滑坡湖，拉张裂缝与主裂缝，剪切裂缝，羽状裂缝，膨胀裂缝，放射状（扇形）裂缝，牵引性张裂缝，主滑线（滑坡主轴）。本文第二章已详细介绍了一个发育完全的滑坡所具有的种种外貌特征，此处不再重复。

但在工程实践中，由于发育不完全、结构复杂相互干扰或缺失某些特征，遇到的滑坡很少具备以上提到的完整而清晰的要素特征，因此，需要根据当地的实际地质地貌条件等特征来判别滑坡。

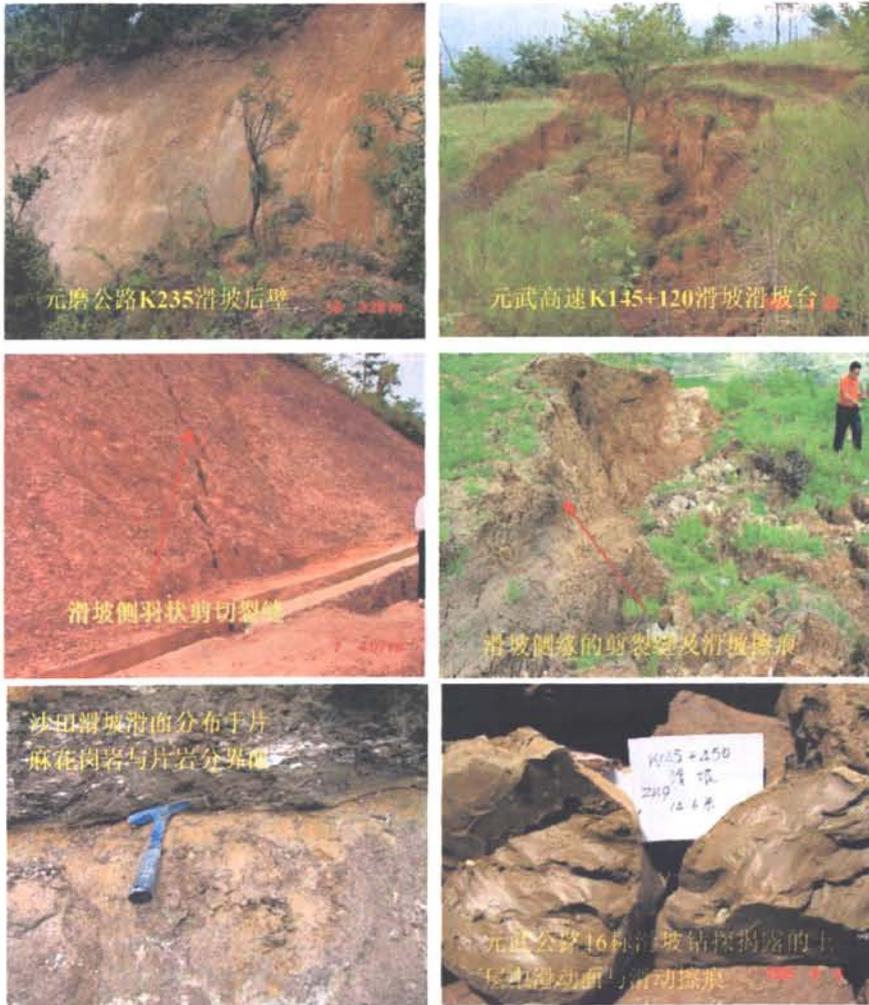


图 4.2 滑坡典型形态特征

路基边坡体在发生滑动之前，经常会发生一些先兆现象，比如地下水位变化显著，干涸的泉水重新出水并且混浊；边坡上部下陷现象不断，外围出现弧状裂缝；坡脚处湿地增多，范围扩大；斜坡前缘土石零星掉落，坡脚附近出现大量鼓张裂缝，土石被挤紧；

坡面树木倾斜, 建筑物有开裂变形现象等。可以把滑坡在地形、构造、地层岩性、水文、地物等方面的特殊标志, 做为滑坡预判的依据^[39,40]。

(1) 地形地物标志

在山区路基边坡地带, 滑坡区内常形成槽谷状地形和圈椅状地形, 在坡体上部有陡壁及弧形拉张裂缝或出现异常的台坎, 坡脚常毁坏或“侵占”道路、河床、耕地、房屋场地等现象。



图 4.3 滑坡破坏的地面标志

滑坡前缘土体常被挤出或呈舌状凸起, 常伴有揉皱、褶曲或断裂(非构造)现象。滑坡体上发现多级平台, 平台的特征与外围河流阶地明显不同, 在两侧常发育羽状剪切裂缝。在滑坡体外两侧, 易形成沟谷和双沟同源现象, 线状地物被剪断等现象。滑坡后缘断壁上带有顺层擦痕。



图 4.4 K1747+230 下边坡堆积层滑坡引起的破坏现象

在滑坡体上, 常有“醉汉林”、“马刀树”、地面裂缝、房屋开裂、积水洼地等现象。



图 4.5 滑坡体上“马刀树”现象



图 4.6 大红门滑坡引起的开裂现象

(2) 岩土体结构构造标志

滑坡体范围内的岩土体常有松动、扰乱、受水浸润、挤压揉皱、擦痕等现象。基岩与外圈岩体的产状、层位和断层特征不一致，经常被石屑、泥土充填或存在未被充填的压性裂缝及张性裂缝。土体较松散，倾向异常，并伴随出现小型坍塌现象。岩层的构造不连续，产状也会发生明显的变化。

(3) 水文地质标志

滑坡体是复杂的水文地质综合体，无一定规律可循，水文地质条件特别复杂。滑坡体内含水层常被破坏，在滑坡体前缘常有泉水溢出。在滑坡体的后缘断壁上，也常出现泉水或渗水现象。

(4) 内部结构标志

滑动面是滑坡内部结构中最重要部分，是组成路基边坡岩体中最薄弱的面。由于滑坡体的物质成分不同，滑动面可能是基岩侵蚀面，上覆第四纪松散堆积物。而发生在基岩内部的滑坡，一般是沿某一软弱夹层面，作为滑动面，如砂岩夹页岩的地层，可能沿页岩面向下滑动，有的倾角很小的断层带亦可成为滑动面。

在均质土中，滑动面也常常是两种岩性不同的接触面。一般在滑动面的上部有透水性较好的岩层，且地下水丰富，而在滑动面以下透水性较差，以致在滑动面附近聚集地下水，在地下水作用下，滑动面的力学强度降低很大，最终导致滑坡的发生。

滑坡体的内部结构特征，对预判斜坡土体的稳定性有重要意义，如长期处于稳定状态的古滑坡，由于受到风化作用，梯田整平等影响，它的外部形态不明显，若路线以挖方从坡脚通过时，使古滑坡的平衡条件被破坏而重新复活。

滑坡体的各种变异现象之间存在不可分割的内在联系，是滑坡运动的统一产物。因此，须在实践中综合考虑几个方面的特征，绝不能单根据某一标志，就轻率地作出预判。

2. 崩塌预判

对于潜在的崩塌体，其预判方法除了根据坡体所处区域内自然地理、地质条件和人类活动以外，通常崩塌灾害发生的边坡具有明显的外部特征及规律^[41,42]，为灾害预判提供了依据。



图 4.7 崩塌现象

(1) 坡度、坡高及坡型特征

土质边坡坡度一般在 45° 以上，岩质边坡坡度一般在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 以上，且坡高较大；坡型一般呈凸形、阶梯形或凹形陡坡。

(2) 岩土体成分、结构与构造特征

根据近代和古老崩塌堆积体特征，崩塌多发生在胶结不良的砾岩、硬质页岩、石英岩、片麻岩、辉长岩和辉绿岩、闪长岩、石灰岩、砂岩地段，尤其是发生在厚层硬质破碎岩层置于软岩层之上的陡壁附近，一般喷出岩如玢岩、玄武岩和具有较发育的垂直节理的花岗岩也发生崩塌。坚硬而脆性大的岩石构成的斜坡常发生崩塌，此外，有软、硬岩石互层（例如砂岩与泥页岩或板岩互层、石英岩与千枚岩或板岩互层及硅化灰岩与泥灰岩互层等）构成的陡峻斜坡，由于差异风化作用造成斜坡坡面凹凸不平，容易发生崩

塌。

完整坚硬岩层如果夹有薄层页岩时，当岩层倾向线路时，高陡边坡，可能发生大规模的崩塌；软硬相间的岩石边坡，因差异性风化，可能发生小型崩塌；页岩、泥岩等软岩边坡，如果岩层褶曲发育，常发生小型崩塌；如果河谷陡坡由软硬不同岩层组成时；当软岩层在下，而且其分布高度与河水位线相一致时，软岩易被河水冲蚀破坏，上部岩体易于发生大规模的倾倒式崩塌；如果河谷陡坡下部由可溶性岩石(灰岩)组成，由于河流冲蚀和溶蚀作用，下部可溶性岩石将不断被淘空，因此，易于形成岸边大崩塌。

由岩浆岩组成的边坡稳定性一般较好，但当岩浆岩垂直节理(如柱状节理)发育时，并有倾向线路的构造裂面时，易产生大型崩塌。特别是有近水平略向线路倾斜的断层面，且节理发育，易发生大崩塌；当岩浆岩中有晚期岩脉、岩墙穿插时，这些穿插接触面往往是岩体中的薄弱面，它们和各种节理面组合一起，为崩塌提供有利的条件。变质岩的边坡稳定性一般较沉积岩的好，尤其是深变质岩，如片麻岩、石英岩等，其性质与岩浆岩相近。片岩类依其矿物成分不同，工程地质性质有着极大差异。在褶曲发育的片岩、板岩和千枚岩的边坡上，有各种弧形结构面，当倾向线路时，多发生沿弧形结构面的滑移式崩塌。

单一岩石的岩质边坡，比多种岩石的石质边坡稳定。实际调查表明，岩石种类复杂的岩质路堑边坡，一般高度在 20m 以内多属稳定，当高度超过 40~50m 时，多属稳定性较差，当高度超过 60m 时，多属不稳定。在其他条件相同的情况下，阳坡的稳定性较阴坡为好。

(3) 地质构造特征

当线路的走向平行于区域构造线时，尤其是两组构造线的相交处，岩层破碎，易于发生大型崩塌。两种不同年代的岩层，在断层或不整合接触的附近，有地下水活动时，易于发生崩塌。坚硬岩层陡壁下，伏有风化破碎的软质岩层，且标高位于洪水变化幅度范围内时，易于发生大型崩塌。发育在背斜轴部的河流两岸，易于发生顺节理或层理面的崩塌。在断层破碎带的糜棱岩层处开挖边坡，在施工过程中易于发生大型崩塌。

(4) 地貌特征

山坡崩塌现象大都发生在峡谷区段陡峻山坡或边坡处；高台地的边缘也有崩塌现象，但所见较少。易于变形的山坡，其外形常表现为不平顺，在平面上有骤然突出地貌时，应注意检查边坡的稳定性。如山坡具基座地形时，它可能系错落或崩塌堆积体，松散岩层具台阶地形时，多数曾发生过错落，硬质岩层具台阶地形时，可能系崩塌所致，

因此应注意查明是否有再次变形的可能。

在大于 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的陡峻坡脚处有岩堆时，应对岩质边坡的构造面进行调查，如果此时有软硬岩层互层，或有倾向线路的结构面时，应注意再次崩塌、落石的可能。在悬崖峭壁及山坡凹凸不平的地貌上，如果植物生长稀疏，或裸露的基岩表面无苔藓生长，且有新断裂的痕迹时，表示不久前曾发生过崩塌，线路通过这种地段，应注意再次崩塌的可能。



图 4.8 危岩体结构面发育

同时，崩塌灾害的发生还具一些前兆特征，在进行灾害预判时可参考：

- (1) 崩塌或落石的前缘掉块、坠落不断发生；
- (2) 崩塌或落石的脚部出现新的破裂形迹；
- (3) 不时偶闻岩石的撕裂摩擦错碎声；
- (4) 出现热气、地下水质、水量等异常。

3.路基沉陷预判

路基沉陷包括新近堆积土沉陷、软土路基沉陷、黄土路基沉陷等，其共同特点是土体因自重、外部荷载、浸水等作用产生固结变形，变形量超过允许值，固结沉降使病害体与周边土体之间形成裂缝。

路基沉陷的发生不但会导致路基本身结构的损坏，还会因路基顶面的不平整在路面结构内产生附加应力，附加应力本身或与车载等共同作用，最终导致路面结构的损坏。路基沉陷一般发生在填方路段或半填半挖路段的填方侧，路基沉陷的主要表现形式为路基层部标高较周围低，变形破坏主要是垂直位移，形成路面标高上的不连续，路面出现大量的裂缝。

路基沉陷的发生不仅表现为填方裂缝,而且还表现在路面结构的损坏,即路面病害。此外,路基沉陷在特定部位发展到一定程度时还会引起边坡失稳^[43,44,45]。因此,路基沉陷现象可以从以下几方面进行预判:

(1) 填方裂缝

填方裂缝指的是由填方内部发展而成的裂缝,它不仅能造成路基路面的损坏,严重的还会使公路丧失营运能力。在重力和其它因素影响下,路堤填料会产生一定程度的竖向或水平方向的变形,由于路堤各部位变形量不同而造成不均匀沉降,形成填方裂缝,造成路基沉陷现象。

填方裂缝的分类如下:

- a) 按走向分: 横向裂缝(如图 4.9)、纵向裂缝和龟裂;
- b) 按成因分: 变形裂缝(如图 4.10)、水力劈裂裂缝、渗流裂缝、滑坡裂缝、干缩裂缝、冰冻裂缝和振动裂缝等。



图 4.9 路基沉陷引起横向裂缝



图 4.10 变形裂缝

(2) 路面病害

a) 沥青混凝土路面沉陷变形

由于路基沉陷而导致的路面变形也是不均匀的（如图 4.11），一般总有明显的沉陷中心。

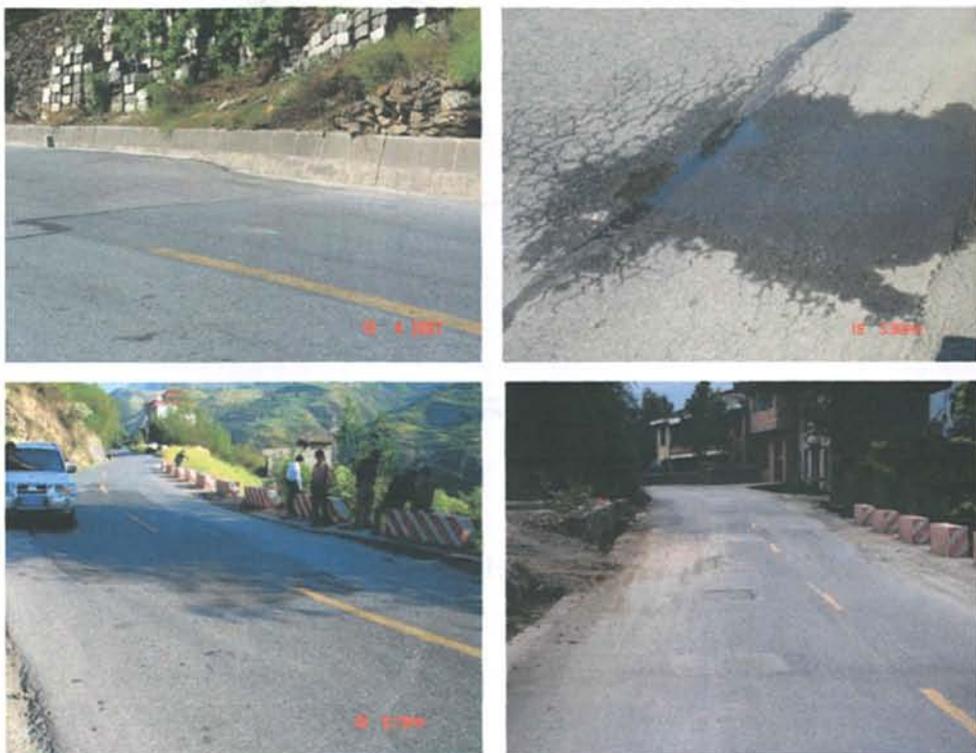


图 4.11 路基沉陷引起路面变形

b) 纵向裂缝

纵向裂缝一般发生在距路堤边缘 3~5m 处，也有一些发生在填挖方交界处（如图 4.12）、互通或服务区分、减速车道与行车道的拼接处。



图 4.12 路基沉陷引起纵向裂缝

(3) 水泥混凝土路面板断裂

当路基沉陷发生时,使路面板脱空失去支撑时,路面板应力超过混凝土强度,导致路面板断裂(如图 4.13)。



图 4.13 路基沉陷造成水泥板断裂

4.2 灾害识别方法

路基地质灾害识别方法是在地质灾害预判的前提下,结合公路地质灾害自身的特点,经过对地质灾害变形发展的阶段性变形现象、标志和临界诱发因素的分析,提出灾害识别的指标,达到对灾害发展进程的识别。本文的识别是针对路基灾害的已有变形破坏迹象和对公路设施产生危害程度的一种识别。

4.2.1 识别指标

路基地质灾害影响因素众多,对公路影响大,因此,须根据工程路段的地形、地貌、水文、地质等条件,地质因素对山区公路路基灾害发生的作用,路基灾害的发生规律;结合路基地质灾害缓变性和突发性的内外特征,灾害孕育发展阶段和爆发阶段的主要标志,提出灾害识别的指标,并对灾害的危险性大小进行判断,为路基地质灾害的防治和治理服务。

地质灾害识别的指标众多,尽管识别指标体系应该牵涉到多方面的因素,但必须根据具体需要,有选择性地选取最有代表性、关键性的指标,尽量舍弃一些与研究目的关系不大的次要指标。

4.2.2 识别指标的选取

识别指标是识别研究的具体体现,它不仅能体现多要素内在的相互关联性和综合性,

又能表达主导性和简明易操作性。路基地质灾害识别指标应该是在野外凭肉眼能直接观察到的,具有直观性特点。

1.崩塌识别指标

(1) 岩性

岩性对岩质边坡崩塌的控制作用是明显的。较陡的地形常由坚硬或较坚硬的脆性岩石构成,如构造节理发育,易发生崩塌。但是,当软岩在相同坡度和高度的情况下,比硬岩的强度低,易于风化,产生崩塌的可能性反而大;软硬相间岩性因差异风化严重,比单一岩性的岩体更易发生崩塌。

(2) 边坡几何特征

路基边坡的坡高、坡度直接影响路基结构内在的应力分布特征,从而影响路基边坡的变形破坏形式以及边坡的稳定性。边坡的几何特征包括边坡坡度、坡高等。

路基边坡坡度大小对崩塌影响显著,坡度越陡,坡顶拉应力越大,顶部岩体节理裂隙越易产生,在其他条件一样情况下,坡度越大,发生崩塌的可能性越大。坡高越大,由贯通的结构面所形成的块体规模越大,影响范围也越大,顶部拉应力也越大,岩体崩塌危害越大。

(3) 结构面特征

岩体结构面对路基崩塌灾害的影响在于结构面特别是软弱结构面对岩体稳定性的控制作用,它们构成潜在切割面。

① 结构面产状

结构面产状包括结构面组数、倾向、倾角三个要素。

根据结构面与坡面组合关系,可以把结构面分为顺坡向($0^\circ < \beta \leq 30^\circ$)、斜交($30^\circ < \beta \leq 60^\circ$, $120^\circ < \beta \leq 150^\circ$)、横交($60^\circ < \beta \leq 120^\circ$)、逆坡向($150^\circ < \beta \leq 180^\circ$)四类,其中 β 为结构面倾向与边坡倾向间的夹角。

结构面走向和路基边坡坡面走向之间的关系决定了发生灾害的可能性大小,结构面走向与坡面走向夹角越大,发生灾害的可能性越小。

顺坡向控制性结构面可形成崩塌灾害的底边界,当倾角小于坡角时,易发崩塌灾害。横交和斜交结构面可形成崩塌体的侧边界,两组斜交倾坡外软弱结构面组合交线倾角小于坡角时,发生崩塌的可能性就大。逆坡向结构面可形成崩塌体的后缘边界条件,与顺坡向结构面组合,将大大增加崩塌发生的可能性。路基边坡受一组或多组结构面的切割,

对路基崩塌的影响是不同的。当路基边坡受多组结构面切割时，崩塌发生的可能性大大提高。结构面的组数和数量也是直接影响崩塌灾害的因子。

②结构面特性

结构面特性主要包括结构面的连通性和充填特性。结构面的连通性控制着崩塌的规模，根据结构面的延伸长度，可将结构面的连通性分为四种情况：连通性好、连通性较好、连通性一般、连通性差。结构面的充填特性包括充填物的成分、厚度、密实度等，结合实际工程经验，可以将充填特性分为好、较差、差三类。充填特性好指充填物厚度小、不连续；充填特性较差指充填物具有一定厚度、连续分布；充填差指充填物厚度大、连续分布。

(4) 潜在崩塌体的边界条件

路基边坡岩体中的各种结构面及其组合形式，决定了路基边坡中潜在崩塌体的边界条件及其不稳定的程度，集中反映了地质构造对路基边坡的影响。

(5) 崩塌体后缘裂缝

崩塌体后缘裂隙不断扩展，相互贯通，会成为影响岩体稳定的潜在不稳定因素。裂隙将岩体切割成不同的块体，在临空面存在的情况下，构成危岩体，使岩体稳定性极差。后缘的卸荷裂隙能引起应力重分布，从而形成与崖壁近于平行的裂隙。裂隙绝大多数走向与崖面基本平行，倾角较陡，且倾向崖外。

(6) 灾害规模

在其他条件相同情况下，崩塌体的规模是造成灾害损失大小的重要因素，因此，当一个地区出现过大规模崩塌、滑坡，说明这个地区路基地质灾害危险性高；反之亦然。

2. 滑坡识别指标

(1) 坡度

坡度对路基滑坡灾害的发生有控制作用，坡度不同，不仅会影响坡体内下滑力的大小，还在很大程度上影响着路基边坡变形破坏的形式和机制。

(2) 坡高

在其他条件都相同的情况下，坡高越大，剩余下滑力越大，坡体越不稳定，在进行滑坡危险识别时，应着重考虑。

(3) 岩性

岩性是滑坡形成的物质基础，是滑坡发生的主体以及介质的组成物质，岩性对路基边坡的稳定性有很大的控制作用。岩性反映着岩土体的结构特征，对滑坡稳定性最有利

的是坚硬岩石，最差的是松散堆积物。

(4) 软弱地层

软弱地层的存在，不仅因其工程特性差而影响路基坡体的稳定性，还常作为控制性的底滑面直接降低坡体的稳定性，特别是当软弱岩层在适当的地下水作用条件下可能形成软弱夹层，更是大幅度降低坡体的稳定性。

(5) 地面变形迹象

前后缘形变和地面宏观变形在野外识别滑坡危险性中具有很大的控制意义。因为其它的因素基本上都只是反映了坡体赋存的地质环境和其本身的结构组成等静态信息，只有地面变形现象能在一定程度上反映了斜坡变形发展的阶段，这对于在宏观上识别路基坡体的危险性有很大的参考价值。

(6) 地下水

斜坡上有无地下水出露及出露情况等对岩土体的稳定性影响很大。

(7) 滑坡规模

滑坡规模大小反映了滑坡危险度的大小。滑坡造成的公路交通灾害大小不仅取决于滑坡本身的规模及所处发展阶段，还取决于公路与滑坡的相对位置以及公路等级。当公路位于滑坡体上或滑坡体前缘附近，滑坡体的滑动造成交通中断，出现路基下沉、滑移、开裂、掩埋等现象，此时灾害的大小与滑坡规模成正比。当公路位于滑坡体后缘之上，滑坡体的滑动可能造成路基出现缺口或轻度的开裂、滑移，可通过修建路肩墙，抗滑挡土墙等措施修复，造成的公路损失较小。公路等级高，固定资产投资多，交通量大，遭受同等规模滑坡破坏造成的损失大。

所以公路滑坡灾害的危险性应根据滑坡规模，结合公路与滑坡体的位置关系、交通量、治理方案的工程投入等综合分析判定。

3.路基沉陷识别指标

(1) 排水条件

实践表明，综合排水和防护不完善是路基沉陷的另一主要因素，如果路基排水条件不健全使地面水渗入路基，雨水的浸泡和冲刷会使路基承载力下降，最终导致路基沉陷。

排水防护设施不完善，布置不合理，导致地表水下渗，造成路基、路面破坏，高填土路堤多在少雨的春季形成，少雨、缺水，难以保证最佳含水量和压实要求，土的孔隙大，路基建成时，又多在夏季，必然要遭受夏季暴雨的冲刷损坏。即使是路面形成后，当路面排水不善时，可导致路基上侧雨水漫过路面，从路面渗入路基，造成路基浸水和

软化。

(2) 地下水位

路基土体在地下水的交替作用下，含水量反复变化。同时，由于毛细管张力引起的孔隙水压力可以达到相当的数值，再加上水的软化、润滑效应，可以使土体产生沉降变形。

路基或地基中地下水的动态特征对路基沉陷影响很大。地下水的潜蚀作用及动态变化影响着土体的结构特征和强度，导致路基沉陷现象。

地下水出露位置和排水状况对路基稳定有较大影响，加强路堤内部排水设施，对减少路基沉陷，增强稳定性非常重要。

(3) 地面裂缝

地面裂缝情况在识别路基沉陷现象时具有很大的意义，它在一定程度上反映了路基沉陷的发展阶段和危害程度，这对于从宏观上判断路基沉陷具有很大的参考价值。

(4) 填土高度

公路工程中，不同路段的路基填土高度是不同的。路基土的填筑高度愈高，沉降稳定期愈长，且累积沉降量也愈大，路基发生沉陷的可能性越大。

(5) 土质

不同类型的土具有不同的压实性能，土的类型不同，发生沉陷的可能性不同，砾类土和砂类土是很好的路基填筑材料，而粘性土和粉土则属于不良公路用土。

(6) 规模

路基沉陷的规模采用沉陷的长度和深度来表征，参考公路技术状况评定标准。

4.2.3 识别指标体系

根据上述定性分析结果，选取了路基地质灾害识别指标因素，并初步建立图 4.14 所示的识别指标体系，其中每个识别指标包含多个影响因子，它们共同组成路基地质灾害识别指标体系。

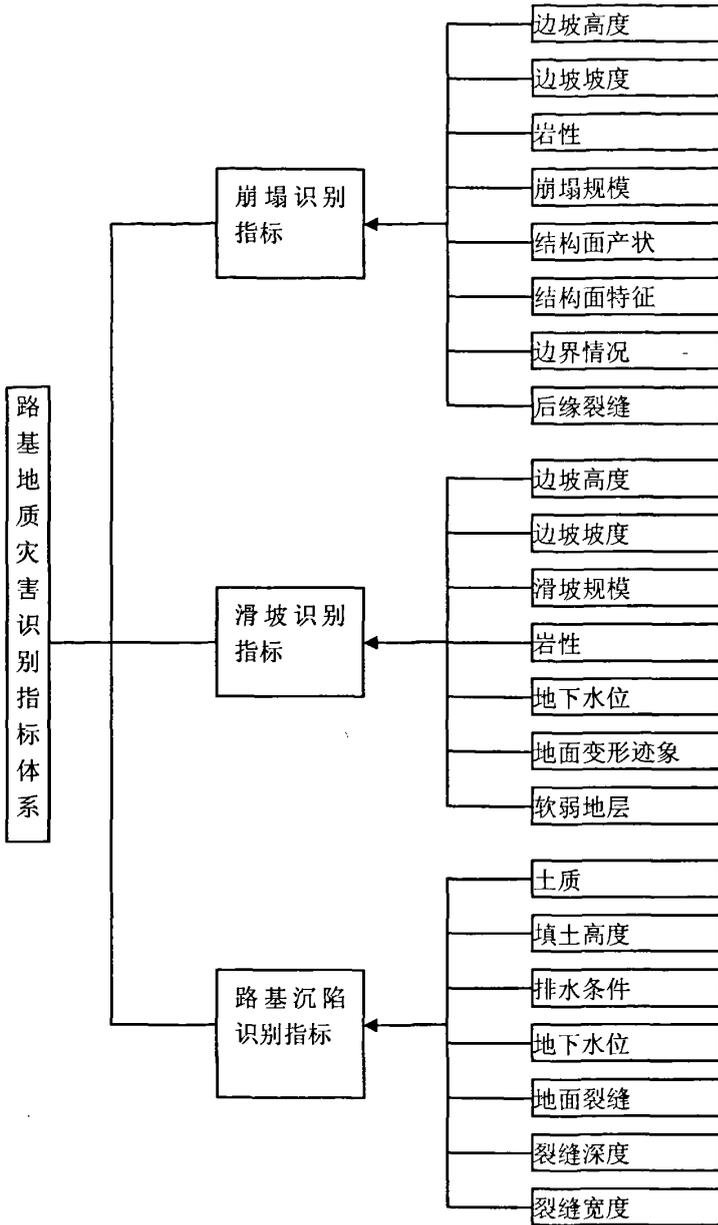


图 4.14 路基地质灾害识别指标体系

4.2.4 识别指标权重的确定

通过对路基地质灾害识别指标的分析 and 专家意见的归纳，可以将各识别指标按影响作用的大小排序，并得出主要识别指标和次要识别指标。

崩塌

识别指标排序:后缘裂缝 > 结构面产状 > 结构面特征 > 边界情况 > 岩性 > 规模 > 边

坡坡度>边坡高度,

主要识别指标: 后缘裂缝、结构面特性、结构面产状、边界情况、岩性

次要识别指标: 规模、边坡坡度、边坡高度

滑坡

识别指标排序: 地面变形迹象>软弱地层>地下水位>岩性>规模>边坡坡度>边坡高度,

主要识别指标: 地面变形迹象、地下水位、软弱地层、岩性

次要识别指标: 边坡坡度、边坡高度、规模

路基沉陷

识别指标排序: 排水条件>地下水位>地面裂缝>长度>宽度>填土高度>土质,

主要识别指标: 排水条件、地下水位、地面裂缝、长度、深度

次要识别指标: 填土高度、土质

根据灰色系统中的关联度分析方法可知,若是由关联度大小排列而得到的关联序,只要有确定的母序列和子序列,样本数等于或大于5个,则母序列和子序列之间的关联序就始终保持不变。所以,根据关联度的这一特性和各识别指标的平均关联度,可以排出各灾害的关联序。

崩塌: 后缘裂缝=结构面产状=结构面特征=边界情况=岩性>规模>边坡坡度=边坡高度

滑坡: 地面变形迹象=软弱地层=地下水位=岩性>规模>边坡坡度=边坡高度

路基沉陷: 排水条件=地下水位=地面裂缝=长度=深度>填土高度>土质

从平均关联度最小的次要影响因子开始,给定其起始权数(这里取1.0),以此为公差,依次呈等差级数向关联度增大的方向递增次要识别指标的权数;为突出主要识别指标与次要识别指标从量变到质变的区别,主要识别指标的权数以最大的次要识别指标的权数为基数,以2为公比,呈几何级数继续递增。则可得到各识别指标的权数和权重,见表4.3~4.5。

表 4.3 崩塌识别指标的权数和权重

识别指标	边坡高度	边坡坡度	规模	岩性	边界情况	结构面产状	结构面特性	后缘裂缝
权数	1	1	2	4	4	4	4	4
权重	0.04	0.04	0.08	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17

表 4.4 滑坡识别指标的权数和权重

识别指标	边坡高度	边坡坡度	规模	岩性	地下水位	软弱地层	地面变形迹象
权数	1	1	2	4	4	4	4
权重	0.05	0.05	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20

表 4.5 路基沉陷识别指标的权数和权重

识别指标	土质	填土高度	长度	深度	地面裂缝	排水条件	地下水位
权数	1	2	4	4	4	4	4
权重	0.04	0.087	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17

4.2.5 识别指标量化取值

路基灾害识别指标多为定性指标，不能直接用于计算，必须进行量化。本文采用半定量专家取值法对不同级别或条件下的识别指标建立了四级取值标准：0 代表“危险性小”，0.3 代表“危险性中等”，0.7 代表“危险性大”，1 代表“危险性极大”。小的数值赋予对灾害发生影响小的情况，大的数值赋予对灾害发生可能性大的情况。

赋值标准如表 4.6~4.8。

表 4.6 崩塌识别指标赋值

级别 指标	0 (危险性小)	0.3 (危险性中等)	0.7 (危险性大)	1 (危险性极大)
坡度	<30°	30°~45°	45°~60°	>60°
坡高	<10m	10m~30m	30m~60m	>60m
岩性	极软质岩石	软质岩石	次坚硬岩石	坚硬岩石
后缘裂隙	裂缝不发育	裂隙闭合	裂隙较发育	裂隙发育明显
边界情况	不清楚，无新的变形破坏迹象	较清楚，变形破坏迹象不明显	较清楚，存在轻微的变形破坏迹象	清楚，新的变形破坏迹象明显
结构面产状	结构面组数少，不发育倾坡外结构面；控制结构面为横交和逆坡向，无顺坡向控制结构面	控制结构面与坡面斜交	发育有倾坡外的长大裂隙	结构面组数大于 3 组，间距小于 30cm；发育顺坡向控制结构面
结构面特征	为硬性结构面且连通性差	控制结构面为硬性结构面且连通性一般；潜在滑面未贯通	不利控制结构面为软弱结构面，连通性较好	结构面夹泥严重；不利控制结构面为软弱结构面且连通性好
规模	<10m ³	10~500m ³	500~3000m ³	>3000m ³

表 4.7 滑坡识别指标赋值

级别 指标	0 (危险性小)	0.3 (危险性中等)	0.7 (危险性大)	1 (危险性大)
坡度	<15°	15°~20°	>45°	20°~45°
坡高	<10m	10m~30m	30m~60m	>60m
岩性	硬岩	软弱岩体	软硬岩相间	松散堆积物
软弱地层	无	夹层且含水差	夹层且含水一半	基座; 夹层且含水丰富
地面变形 迹象	无变形迹象	斜坡体后缘有1~2条拉张裂缝, 前缘有轻微隆起	斜坡体后缘拉张裂缝贯通, 前缘隆起	斜坡体后缘有多条深大的拉张裂缝, 前缘有明显的隆起
地下水	地下水位在坡脚以下	地下水在坡脚以上, 但无地下水出露	斜坡中有局部隔水层, 坡脚有少量地下水出露	地下水位在基岩面以上或坡脚处, 有较多地下水呈带状出露
滑坡规模	<1000m ³	1000~5000m ³	5000~20000m ³	>20000m ³

表 4.8 路基沉降识别指标赋值

级别 指标	0 (危险性小)	0.5 (危险性中等)	0.7 (危险性大)	1 (危险性大)
排水条件	数量、位置、尺寸均能达到要求	主干沟的排水设施数量基本满足要求, 支沟数量略显不足	排水设施数量略显不足, 部分位置不合理	排水设施数量严重不足, 尺寸不足, 位置不合理
地下水位	低于路基坡脚	低于路基高 1/3	低于路基顶面	高于路基顶面
地面裂缝	无	少数, 不明显	较多裂缝, 比较明显	多数裂缝, 很明显
填土高度	<2m	2m~5m	5m~10m	>10m
土质	砂、砾类土	粘性土	粉性土	软土、失陷性黄土
深度	<30mm	30mm~50mm	50mm~100mm	>100mm
长度	<5m	5m~10m	10m~20m	>20m

4.2.6 灾害识别方法的建立

灾害识别方法是对灾害的危险性进行的简单识别, 是利用前述识别指标的等级及赋值, 结合识别指标的权重, 判定路基灾害对公路设施的危害程度, 这里用危险程度指数表示其大小。

将路基地质灾害的各识别指标的赋值与其权重的乘积之和, 即得到路基地质灾害的危险程度指数, 记为 R , 且有 $0 \leq R \leq 1.0$ 。各识别指标的赋值等 0, 0.3, 0.7 或 1 中的一个值; 各识别指标的权重见表 4.3~4.5, 则路基地质灾害的危险程度指数的计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^n k_i G_i \quad (4.1)$$

式中： R —路基地质灾害的危险程度指数 ($0 \leq R \leq 1.0$)；

G_i —各识别指标的赋值；

k_i —各识别指标的权重；

n —识别指标的数量。

各识别指标的赋值参照表 4.6~表 4.8。

通过 2007 年~2009 年调查 G316 线的路基地质灾害现场调查资料验证危险程度指数，得出如下建议：

(1) 在实践中运用危险程度指数 R 对路基地质灾害进行危险性检验时：当识别指标体系中的绝大多数主要识别指标取值很大，次要识别指标取值也很大时，即对 R 超过 0.85 时（崩塌、路基沉陷）或 R 值超过 0.8 时（滑坡），往往是主要识别指标对路基的安全构成严重威胁的水平，应予以高度重视。

(2) 当识别指标体系中的多数主要识别指标取值很大，次要识别指标取值也比较大时，即对崩塌和路基沉陷 $R = 0.55 \sim 0.8$ 或滑坡灾害 $R = 0.65 \sim 0.8$ 时，尽管路基发生严重灾害的可能性不是很大，但路基灾害发生的可能性仍然存在，不可掉以轻心，应加强对路基灾害段的巡查，对路基出现的局部损坏应提前修复，保证路基的整体稳定，以及防护工程的完好无损，使防护工程能够起到应有的作用。

(3) 当识别指标体系中少数主要识别指标取值很大，次要识别指标取值较大时，即崩塌和路基沉陷的危险程度指数 $R = 0.3 \sim 0.55$ 或滑坡灾害 $R = 0.35 \sim 0.65$ 时，路基发生严重灾害的可能性不大，险情较容易控制，通过抢险措施可使险情消除。

(4) 当路基灾害各识别指标的取值较小时，即对崩塌和路基沉陷的危险程度指数 $R \leq 0.3$ 或滑坡灾害 $R \leq 0.35$ 时，公路路基发生严重灾害的可能性很小，说明路基基本上是安全的。

公路路基地质灾害的危险程度指数及危险程度评价的建议值、灾害特征以及应采取的对策，见表 4.9。

表 4.9 路基地质灾害的危险程度指数及特征

路基地质灾害危险程度指数 R	危险程度评价	灾害特征	灾情预测	防治对策
$R \geq 0.85$ (崩塌、沉陷)	极严重	绝大多数主要识别指标取值均很大，次要识别指标取值也比较大时，组合后的危险程度高，极易发生路基地质灾害。	可能造成严重地质灾害	以防治为主、综合治理，应及时采取综合防治措施，提高路基抵御灾害的能力
$R \geq 0.8$ (滑坡)				

表 4.9 路基地质灾害的危险程度指数及特征 (续)

路基地质灾害危险程度指数 R	危险程度评价	灾害特征	灾情预测	防治对策
$R = 0.55 \sim 0.85$ (崩塌、沉陷)	严重	多数主要识别指标取值很大, 次要识别指标取值比较大, 组合后的危险程度较高, 易发生路基地质灾害。	可能造成较严重的灾害	采取防治结合的方式, 加强预测和预警工作, 采取合理的防治措施, 消除隐患
$R = 0.65 \sim 0.8$ (滑坡)				
$R = 0.3 \sim 0.55$ (崩塌、沉陷)	中等	少数主要识别指标的取值很大, 次要识别指标取值较大, 组合后的危险程度不高, 可能会发生轻微的危害, 易于采取工程预防措施予以控制。	路基地质灾害较少发生	以防治为主、综合治理, 对存在的灾害隐患和防护缺陷, 采取适当措施进行治疗, 加强巡查, 及时发现问题
$R = 0.35 \sim 0.65$ (滑坡)				
$R \leq 0.3$ (崩塌、沉陷)	轻微	各识别指标的取值较小, 组合后的危险程度较低, 发生轻灾害的可能性存在	一般情况下不会发生较严重的灾害	以防治为主、综合治理, 加强巡查, 及时发现对路基安全造成不利影响的因素并解决
$R \leq 0.35$ (滑坡)				

第五章 公路路基地质灾害识别方法的应用

2006年,长安大学承担了交通部西部交通科技建设项目“路基灾害防治技术推广及应用示范”。依托该项目在陕西省G316线进行了路基地质灾害识别方法的重点研究和应用,项目组根据调研到的各类资料,认真分析了该路段沿线路基地质灾害的特征,提出了路基灾害识别指标,项目组多次前往现场对该路段的路基灾害运用识别方法进行了判别,指导了公路灾害防治工程的勘察、设计及施工。

本文依托交通部西部交通科技建设项目“路基灾害防治技术推广及应用示范”,针对典型灾害点进行野外调查,研究归纳了路基地质灾害的类型和影响因素,分析了路基工程地质结构,集成了路基地质灾害识别方法。为了对路基地质灾害识别方法做出进一步的说明,这里选择陕南秦巴山区G316线庙岭滑坡作为示例,通过基础资料搜集、野外现场调查和理论分析等工作,进行相应的地质灾害识别。

5.1 依托工程路段概况

5.1.1 陕南秦巴山区自然条件概况

陕南秦巴山区横跨秦岭、大巴山两大地质构造单元,地域广阔,地质构造错综复杂,岩性多变,地形深切,结构复杂。滑坡、崩塌、泥石流、洪水等灾害严重,同时,各种灾害类型迭加,造成灾情升级。

(1) 地貌

陕西省地貌复杂多样,而从大的地貌形态上说,陕南多为山地。陕南山地位于秦岭北侧山前断裂以南的广大地区,以山地为主,间有盆地分布。地势大致西高东低,南北高,中间低。汉江横贯中部,以北为秦岭、陇山山脉,以南为大巴山脉。

陕南山地新构造运动间歇性上升,河谷多呈谷中谷形态特征,谷肩以下谷坡坡度呈陡-缓-陡的变化,形成复式坡。这样的坡形特征,地表径流易于汇集,临空面大,斜坡稳定性差。根据有关资料统计,当斜坡坡度 $>45^\circ$ 时,以崩塌形变为主;坡度 $<45^\circ$ 时,则以滑坡形变多见。

G316线所经区域,由于受长期构造抬升、水流侵蚀切割作用及风化剥蚀作用,路线所经范围地形、地貌复杂多变,主要有中低山地貌、丘陵地貌。地形条件是造成崩滑流等地质灾害的重要因素,它充分控制着滑坡方向及范围。

调查区域内,以中山为主,中低山和低山丘陵次之,具有山地面积大、沟壑密度大、

地面坡度大、河（沟）床比降大、相对高差大等特点，均为滑坡发育的地区。其中，中山属强烈上升的褶皱断块山地，高程 1000~3000m，相对切深 300~1000m，山势陡峻，现代流水侵蚀强烈，沟谷纵比降大；中低山和低山丘陵分布于石泉以下汉江两岸及山间盆地四周，高程 500~1000m，相对切深 100~700m，斜坡上缓下陡，侵蚀作用强烈，边坡稳定性差。

（2）地质构造

路段大地构造属华南板块，南秦岭褶皱带。具体为徽县-旬阳、华力西-印支海盆，主要断裂构造有三条，均为北西向，其中公馆-白河高角度逆断层，破碎带宽数十米至百余米，对公路灾害形成有一定影响。

地层节理发育，一般为 3 组，坚硬岩石多切割为块状结构，软弱岩石多切割为碎裂结构，在风化及人为活动的影响下对边坡的稳定性影响较大。

（3）地层岩性

设计区地层主要为第四系、泥盆系、志留系和寒武、奥陶系。除第四系地层外，其余为一套浅变质岩地层。

1) 第四系（Q）

该地层在区内沿线广泛分布，主要岩性：

- 冲洪积砂砾石和含砾低液限粉土

沿汉江与汉江支流的河漫滩和河流阶地均有分布，砂砾石不仅数量大，而且品质好，是较好的筑路材料，含砾低液限粉土，也是较好的路基材料。

- 坡残积土

该类土在设计区分布广泛，主要出露于山坡坡体和较大的古滑坡体上。该地层厚度变化大，岩性复杂，沿线大部分滑坡，滑塌和泥石流等公路灾害由此岩性构成。在公路灾害治理中对此土体的工程特性应进行认真调查和分析。

- 红色粘性土

该类土主要出露在沿线较大的古滑体中、上部和一些高阶地平台上，分布少，且不连续，厚度变化大。该类土多数具有中、弱膨胀性，工程性质较差，易造成路基沉陷变形、滑坡、滑塌等公路灾害。

2) 泥盆系（D₁、D₂）

泥盆系下统（D₁）分布于旬阳县城以北，岩性主要为：白云岩、白云质灰岩和砂岩，该地层出露少，工程性质好，是当地较好的筑材。泥盆系中统（D₂）分布于县城以南主

要岩性为：千枚岩、灰岩和含铁砂岩，区内分布较广，多数为千枚岩，工程性质差，是造成公路灾害最主要的地层岩性。

3) 志留系 (S)

该地层为设计区内的主要地层，在治理区沿线广泛分布，岩性主要为：炭质千枚岩、千枚岩夹砂岩、灰岩、炭质绢云母石英片岩夹硅质灰岩，该地层工程性质较差，也是造成区内公路灾害的主要地层岩性。

4) 寒武—奥陶系 (Є—O)

该地层主要分布于白河—蜀河之间，为设计区内主要地层，岩性主要为：硅质岩、炭质板岩、灰岩、白云灰质岩和千枚岩。该地层强度高，是良好的筑材，在人工高边坡上易产生崩塌灾害。

(4) 气候条件

该区跨暖温带与北亚热带，属海洋性向大陆性过渡气候，气候温暖，雨量充沛，年降水量 800~1200mm。年平均气温 15.7℃左右，年最高气温 31℃左右，年最低气温高于 -10℃，年降雨量平均在 800~1000mm 之间，年降水季节差异大，夏季降水量多，占全年 38~45%，特别是暴雨季节易形成公路水毁，并造成各类公路灾害，如滑坡、崩塌、泥石流等；冬季最少，仅占全年的 2.6~4.4%。

(5) 河流特征

秦岭山脉为黄河流域与长江流域的分界岭，秦岭山地的水系甚为发育，且以主脊为界分属长江流域的汉江、嘉陵江和黄河流域的渭河、南洛河等 4 个水系。其中，汉江水系集水面积占 61.2%，渭河水系占 23.9%，嘉陵江占 8.9%，南洛河占 5.8%。秦岭南坡的丹江、旬河、乾佑河和金钱河为汉江支流。这几条河流与它们的大小支流构成了本区河网密布，河谷发育的特点。

河流水系的网络形态、组成和河谷特征，受地质构造影响显著。秦岭山体呈北仰南俯，西高东低的总趋势，使区内河流多呈自西向东的纬向流动，河网分布南北两坡极不对称。秦岭南坡河道较长，主要河流的流程均在 100km 左右，最长的可达 200km 以上；河谷比降多在 10‰以下。秦岭南坡河网结构比较复杂，格状、树枝状和不对称水系均有分布。河谷平面形态多为宽谷与峡谷交替。宽谷河段河床比降小，沉积和侧向侵蚀作用明显；峡谷段一般为侵蚀河床，下蚀作用强烈，河谷狭窄、比降大。秦岭北坡河流短小，流程多在 50km 以内，河谷纵坡多在 10‰以上，形成了谷短坡陡的现象。河谷横断面形态为“V”、“U”型复式重叠，下部多为“V”型，中间常呈“U”型，上部则较为宽敞。沿流

程峡谷与曲流交替，峡谷口多分布着山麓洪积扇和洪积锥。河流曲折多呈钩钩型水系。

陕南秦巴山区发源于秦岭南坡属于汉江水系的干、支流众多，主要河流有旬河、丹江、子午河等，沿河路基下边坡常受洪水位涨落和洪水冲刷影响，边坡易出现滑坡、溜滑现象。

(6) 地下水

沿线地下水主要为松散岩类孔隙水和基岩孔隙裂隙水。松散岩类孔隙水分布广泛，地下水位与水量随季节变化较大，特别是坡残积土层中地下水对边坡的稳定影响很大，常常是造成路基上下边坡滑坡和滑塌的重要因素。沿线地下水水质好，水量大，是良好的工程用水。

(7) 地震

秦巴地区地震分布零散，没有明显的周期性与成带性，活动频度、强度均不高，有记载发生 4 级以上地震共 16 次，四百年间发生过 6 次 6~7 级地震，4 级地震占 80% 以上，震中位于不同方向断裂带交接部位，总之，该地区属弱地震活动区，根据《中国地震动参数区划图（GB18306—2001）》，地震动峰值加速度为 0.05g，地震动反应谱特征周期旬阳以东为 0.40S，石泉-西乡为 0.45S，相应的地震基本烈度 VI 度。

5.1.2 陕南秦巴山区 G316 线概况

G316 线东起福建省福州市，横贯江西、湖北、陕西，西抵甘肃省兰州市，全长 2915km，是连接东中西部一条重要交通干线。G316 线陕西段，东起与湖北省郧西县交界的安康市白河县(K1715+050)、经旬阳县、汉滨区、汉阴县、石泉县、西乡县、城固县、汉台区、留坝县，止于与甘肃省两当县交界的宝鸡市凤县（K2338+100），全长 622.798km。其中安康市石泉县（316 线里程桩号 K1994+200，210 线里程桩号 K1198+200）到汉中市西乡县古城镇（316 线里程桩号 K2059+000，210 线里程桩号 K1258+600）段，G316 线与 210 线并线，并线长约 62km，其间公路里程桩号采用国道 210 线桩号。

线路自东向西穿越陕南的秦巴山区，地貌除汉中和安康盆地外，大部分地段属山岭重丘区，高山峡谷，地势陡峻，沿线地质构造复杂，地层岩性多样。试点工程路段重点为 G316 线安康白河-汉滨（K1715+050~K1885+750）段，汉中西乡境内段。该路段由于自然地质条件的独特性及复杂性，为各类公路灾害的产生奠定了背景条件，再加之公路初建等级低，虽经多年改造、养护，但由于投入不足，部分处治欠合理，沿线每年不同程度发生各类公路灾害，不但中断交通，甚至导致车毁人亡等重大事故，特别在不利

年分、灾情更为严重。主要公路灾害有滑坡、崩塌、沉变和路基沉陷等。

5.2 路基灾害识别实例-庙岭滑坡灾害的识别



图 5.1 庙岭滑坡

庙岭滑坡位于一个巨大的古滑坡体中部两侧，属于坡残积物滑坡，涉及公路上边坡和下边坡，如图 5.1。古滑坡位于汉江一级支流出口处，古滑坡前缘和后缘地面高程介于 716.0~801.0m 之间，相对高差约 85m。古滑坡体横向宽约 300m，纵向长约 200m。古滑坡地层岩性：滑体上部为坡积碎石土，碎石为灰绿色，主要有千枚岩风化形成，磨圆度差，成棱角状。其间夹较大块石，土中含少量粘性土及石英，呈松散、稍密或中密状态，滑体土质为千枚岩风化的坡积土，结构松软，厚度较大。公路从滑坡体中部地段通过，滑坡滑动导致公路路基发生沉陷。路面沉陷最大达 2m、部分路段上边坡产生滑塌、上挡墙局部破坏。

5.2.1 灾害初判

通过野外调查，并利用路基工程地质结构理论，分析发现此路段的路基岩土结构为上软下硬的基座式结构，路基断面形式为半填半挖，这类结构的常见病害是软弱岩土沿下伏相对坚硬岩土层产生滑动，可能发生滑坡灾害。

5.2.2 灾害预判

灾害预判是在灾害初判的基础上，根据路基灾害的具体特征对潜在的危害体进行判别，从而确定路基地质灾害类型。

在坡体上能清楚的看到滑坡周界、滑坡舌、滑坡鼓丘、滑坡平台等特征，另外，可通过观察到的坡体现象对此滑坡进行预判(如图 5.2)：坡体上出现不完整的圈椅状地形；在滑坡体外两侧，形成了沟谷，并出现双沟同源现象；滑坡体上植被发育程度与周围地形差异明显，坡体上微地形凌乱，杂乱无规则，坡体上有“醉汉林”现象；滑坡体上房屋有开裂现象出现，裂缝明显；通过滑坡的路面上出现羽状裂缝；斜坡坡脚滑坡舌“侵占”河床，通过以上特征分析，明显能判别此路段为滑坡灾害。

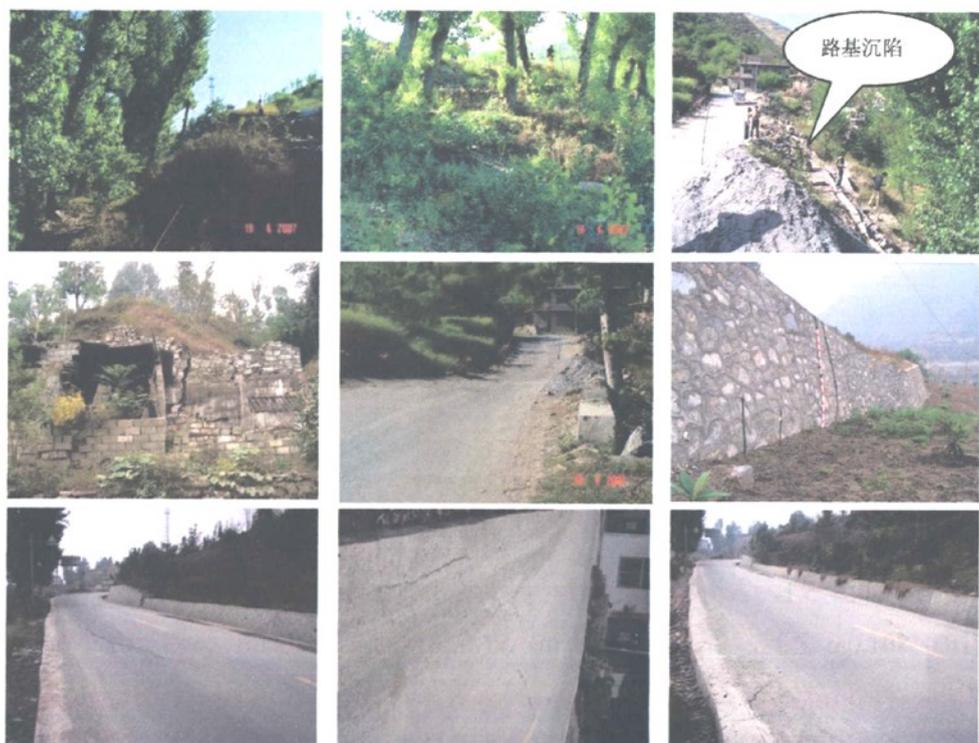


图 5.2 庙岭滑坡现象

5.2.3 灾害识别

根据前面对滑坡灾害危险性识别的分析，需要对此工程点从边坡坡度、边坡坡高、软弱地层、岩性、地面变形迹象、地下水位和规模等七个方面进行分析。

实地调查发现，此滑坡边坡坡度小于 30° ，滑体横向宽约 300m，纵向长约 200m，坡前缘和后缘地面相对高差约 85m，规模比较大，坡面上微地形凌乱，植被一般，路线从滑坡体中穿过，对公路的影响比较大，滑体上部为坡残积碎石土，滑体土质为千枚岩风化的坡残土，结构松软，厚度较大，下部为基岩，属上软下硬基座式坡体结构。调查中还发现，路面上“羽状”裂缝明显，坡体上排水设施不完善，坡残积土层中地下水丰富，两侧滑体均有多处泉水出露，钻孔中地下水位 ZK1 为 1.70m，ZK2 为 0.5m，ZK3

为 4.8m, ZK6 为 23.0m, 地下水属潜水类型, 水质较好。

根据对上述因素的分析, 可得庙岭滑坡识别指标的具体赋值结果, 见表 5.1。

表 5.1 庙岭滑坡识别指标赋值结果

	坡度	坡高	岩性	软弱地 层	地面变 形迹象	地下水	规模	危险程 度指数
赋值	1	1	1	1	1	1	0.7	0.97

庙岭滑坡的危险程度指数 R 为 0.97, 说明此滑坡危险性很高, 与实际情况相符合, 应采取有效措施进行治理。

当地公路管理部门针对庙岭滑坡识别结果, 采取了综合治理措施, 使该路段的防护工程得到了较大程度的改善:

- (1) 在路基上边坡做了高约 1~2m 的挡土墙, 并设置排水孔, 提高了上边坡的抗滑能力。
- (2) 在道路上行方向做了宽约 30cm 的边沟, 有利于将上边坡的雨水排除坡体。
- (3) 在路基下边坡即在剪出口位置设置了直线和凹型相间的抗滑挡墙, 从根本上提高了滑坡体的稳定性。挡墙宽约 2m, 采用块石堆砌, 并用水泥砂浆抹面。

项目组利用路基地质灾害识别方法对 G316 线进行了地质灾害识别, 共判别出滑坡 8 处, 崩塌 68 处, 路基沉陷 23 处。

通过路基地质灾害识别方法在 G316 线的应用, 说明路基地质灾害识别方法是非常实用、易于掌握、较为有效的一种路基地质灾害判别和预测的技术方法, 可以用于公路路基地质灾害调查和初步勘查等阶段, 在路基地质灾害区域性调查领域将会有较为广阔的应用前景。

结论及进一步研究建议

结 论

随着社会经济的飞速发展和各等级公路的不断兴建,近年来公路地质灾害频繁发生,人们逐渐认识到防范和减轻公路地质灾害不仅可以保护公路工程和相关建筑物,而且可以极大地减少社会经济损失。这就首先要求我们对地质灾害进行准确的判别,为有效的控制和管理公路地质灾害提供技术服务,而公路地质灾害识别技术正是这样一个有效的方法,本文在这一领域做了有益的探讨,主要得出了以下结论:

1,在充分总结归纳国内外已有的相关研究成果、吸收各地区治理公路地质灾害经验的基础上,通过调查、分析和研究,归纳了路基地质灾害类型及特征、影响条件和控制因素。

2,提出了路基地质灾害识别研究的技术路线和原则,并从路基型式、内部结构面及岩土体的工程性质三方面提出了路基工程地质结构概念,它不仅构成路基地质灾害的地质基础,而且控制着路基灾害发生的类型。

3,通过对路基地质灾害的调查研究,对路基工程地质结构的研究以及对灾害特征和影响因素的深入分析,提出了路基地质灾害预判方法。

4,经过对路基地质灾害变形发展的阶段性变形现象、标志和临界诱发因素的分析,结合公路地质灾害自身的特点,提出路基地质灾害识别指标;采用半定量专家取值法对识别指标进行赋值,并由灰色系统理论,得出各识别指标的权重值,提出了路基地质灾害危险程度识别方法。

5,通过基础资料搜集、野外现场调查和理论分析等工作,运用路基地质灾害识别方法,对陕南秦巴山区 G316 线庙岭滑坡进行识别,识别结果与实际相符合。

其中,本文基于路基形式、内部结构面和岩土工程性质所提出的路基工程地质结构具有创新意义;从灾害初判→灾害预判→灾害识别的路基地质灾害识别方法亦是本文的重要成果。

进一步研究建议

本文对公路路基地质灾害识别方法进行了研究,公路路基地质灾害涉及内容十分广泛,涉及多门交叉学科,但鉴于时间、精力以及作者的认识水平有限,对一些研究还不够深入、全面,为了进一步的研究,建议:

1,在分析路基地质灾害类型及影响因素时,不仅要反映地质灾害自身的特征,更应结合公路承载体的特点,全面综合的研究路基地质灾害。

2,继续加强路基工程地质结构的研究,通过进一步分析和理论研究,建立路基地质结构与灾害的因果关系,使之更准确的反映工程实际情况。

3,对于路基地质灾害识别指标和指标体系的研究,本文虽然做了一些工作,取得了一定成果,但针对识别指标及指标体系仍有许多值得进一步思考和研究的问题。

参考文献

- [1] Schuster R. L. and Krizek R. J. , Landslides Analysis and Control, Transportation Research Board, Geol. Soc. of Sciences, ashington, D. C, Special Report 176.
- [2] 刘传正.地质灾害勘查指南[M].北京:地质出版社,2000.
- [3] 《工程地质手册》编写组,工程地质手册(第一版)[M],中国建筑工业出版社,1975.
- [4] 金德濂,水利水电工程边坡的工程地质分类[J].西北水电.2000年,第4期.
- [5] 邓必胜.工程地质勘察中滑坡的识别及其防治[J].江西电力,2002,26(6):21-26.
- [6] 李坚.河谷地区滑坡识别与整治措施探讨[J].湖南交通科技,2004,30(3):45-46.
- [7] 吴树仁,金逸民,石菊松等.滑坡预警判据初步研究-以三峡库区为例[J].吉林大学学报,2004,34(4):596-600.
- [8] 史海智.唐房滑坡的识别与稳定性分析[J].边坡工程,2005,9(7):73-74.
- [9] 邵铁全.滑坡地质灾害超前地质预判技术研究[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16.
- [10] 戚宗柯,刘家强.公路滑坡的识别与稳定性分析[J].中国西部科技,2007:11-12.
- [11] 钟志芳.古滑坡对线路的危害以及对古滑坡的一些认识[J].西部探矿工程,2007,10:106-107.
- [12] 向贤礼.关于滑坡勘察的几个问题的探讨[J].西部探矿工程,2007,第7期:4-6.
- [13] 徐卫亚.边坡及滑坡环境岩石力学与工程研究-论地质结构控灾[M].北京:中国环境科学出版社出版,2000.
- [14] 盛海洋,李红旗.我国滑坡、崩塌的区域特征、成因分析及其防御[J].水土保持研究.2004,11(3):208-211.
- [15] 中国灾害防御协会铁道分会.铁路自然灾害及其防治[M].中国铁道出版社,2000.
- [16] 邓颖人,陈祖煜,王恭先等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [17] 晏同珍,杨顺安,方云.滑坡学[M].武汉:中国地质大学出版社,2000.
- [18] 潘懋,李铁峰.灾害地质学[M].北京:北京大学出版社,2002.
- [19] 范宝俊.中国自然灾害与灾害管理[M].哈尔滨:黑龙江教育出版社,1998.
- [20] 徐邦栋.滑坡分析与防治[J].北京:中国铁道出版社,2001.
- [21] 刘红卫.山区公路滑坡研究[C].长安人学硕士学位论文,2005.5.
- [22] 任志华.山区高等级公路高边坡稳定性分析及防护设计[J].昆明理工大学,2005.3.10.
- [23] 李智毅,王智济,杨裕云.工程地质学基础[J].武汉:中国地质大学,1990.

- [24] 王恭先.边坡滑坡原因分析及防治办法[J].重庆建筑,2005.
- [25] 魏丽敏,何群,林镇洪.考虑地下水影响的滑坡稳定性分析[J].岩土力学,2004,25(3).
- [26] 李掉芬,陈虹.雨水渗透与香港滑坡灾害[J].水文地质工程地质,1997(4):34-38.
- [27] 许建聪,尚岳全,陈侃福等.强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18).
- [28] 邓建辉,马水山,张保军等.清江隔河岩水库茅坪滑坡复活机理初探[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1730-1737.
- [29] 李晓,张年学,廖秋林等.库水涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J].岩石力学与工程学报,23(21):3714-3720.
- [30] 习小华.勉宁高速公路岩质边坡稳定性分析与评价[D].西安科技大学硕士论文,2004.
- [31] 邓学钧.路基路面工程[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [32] 李斌.公路工程地质[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [33] 孙广忠.工程地质与地质工程[M].北京:地震出版社,1993.
- [34] 长安大学地质工程系.黄土滑坡有效勘测技术与评价方法研究成果报告[R].陕西省交通科技项目,2006.
- [35] 中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室.谷德振文集[C].北京:地震出版社,1994.
- [36] 文谦.高等级公路岩堆体边坡稳定性分析研究[D].上海:同济大学,2007.
- [37] 曲永新,张永双,覃祖森.三址马红土与西北黄土高原滑坡[J].工程地质学报,1999,7(3):257-259.
- [38] 尚岳全,王清,蒋军等.地质工程学[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [39] 王恭先,徐峻龄,刘光代等.滑坡学与滑坡防治技术[M].北京:中国铁道出版社,2004.9.
- [40] 铁道部科学研究院西北研究所.滑坡防治[M].北京:人民铁道出版社,1977.
- [41] 胡厚田.崩塌与落石[M].北京:中国铁道出版社,1989.
- [42] 曾廉.崩塌与防治[M].峨眉山:西南交通大学出版社,1990.
- [43] 刘忠,潘雪艳.山区公路填方路基不均匀沉降特征及其表现形式研究[J].公路交通科技,2008,4(2):5-9.
- [44] 张剑.灌浆法处治路基不均匀沉降研究[D].重庆:重庆交通学院,2004.
- [45] 陈谦应,蒋树屏,柴贺军等.山区公路路基稳定理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005.

攻读硕士学位期间取得的研究成果

李志强, 刘洁, 马保成, 董卫卫. 山区公路边坡坡顶截水沟设计与分析. 交通标准化, 2008.09

攻读硕士学位期间参与的主要科研项目

- [1] 交通部西部交通科技项目“路基灾害防治技术推广及应用示范”，2006.4~2009.9
- [2] 交通部西部交通科技项目“山区公路防排水评价方法与抗水灾评估指标研究”，2001.10~2005.8
- [3] 陕西省公路局“陕西省公路灾害防治技术指南及设计手册”，2007.11~2008.11

致 谢

值此论文完成之际，谨向我的导师田伟平教授致以最崇高的敬意和最诚挚的感谢！三年来，导师在学习、生活上给予了我无私的帮助和关心，他那襟怀坦荡的高贵品质，高瞻远瞩的思维方式，造诣精深的学术水平，严谨务实的治学态度、精益求精的工作作风、诲人不倦的育人精神、宽厚豁达的处事态度，深深地影响着我，必将使我终生受益。

在完成论文及学业的过程中，一直得到李家春副教授的热心指导和帮助。每当我在学业上遇到重重障碍、陷入迷茫时，李教授耐心的启发和殷切的鼓励总能帮助我重新找到方向、树立信心。生活上也给予我莫大的帮助，在此亦表示衷心的感谢！

感谢在三年的学习、生活中给予我诸多关心与帮助的马保成、齐洪亮、郭平、舒延俊、薛东峰、刘相如、张淼琳等各位师兄师姐，张治国、牟顺、刘春焕、黄丽珍、朱晓斌、孙启亮、赵欢、赵亚杰、韩敏、李朋丽、范俊璞、高婷等师弟师妹，以及我亲爱的同学们、朋友们。他们为我的论文写作提供了大量的资料，并参与了论文的校稿及完善工作，同时多年来在各方面也给予我大力支持，在此一并向他们致谢！