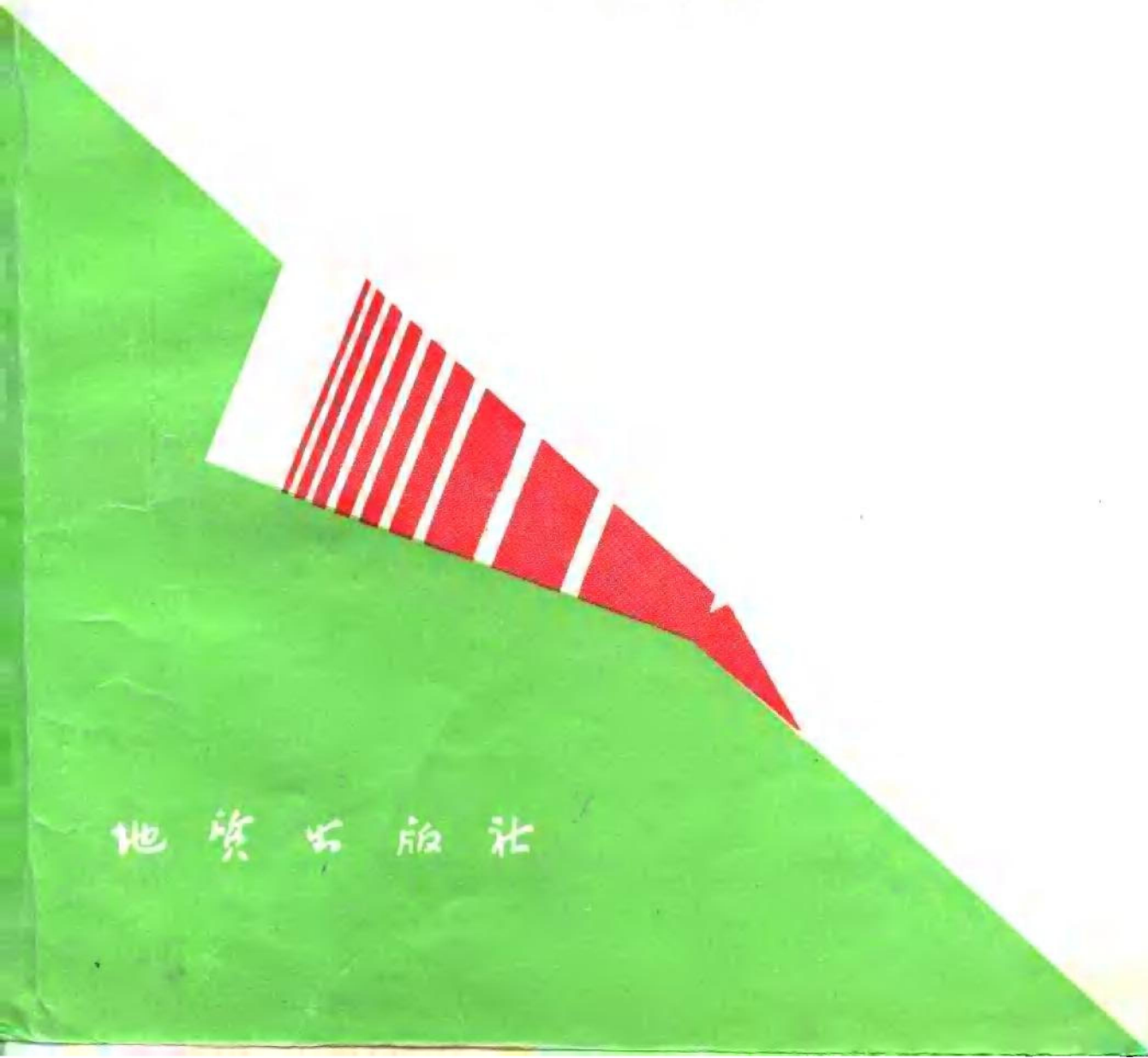


陕西省滑坡工作办公室

滑坡动力学

胡广福等著



地质出版社

陕西省滑坡工作办公室

滑 坡 动 力 学

胡广韬 等著

地 质 出 版 社

·北 京·

序

地质环境或工程地质环境,是以人类的生产、生活和生存发展活动为中心的周围一定范围内的客观地质实体,或因人类的经济-工程活动影响而变异的客观地质实体。它总是在一定的地程平衡状态中发展变化着,并对人类的生产、生活和生存产生一定的影响和干扰;在通常情况下,它能够被人类所适应。然而,在特定的地质条件下,由于某些地质过程的作用,会使地质环境或工程地质环境发生意外的剧烈而骤然的变化,形成一时令人难以适应的灾难性破坏。这就是近年来不少中外学者倡导研究的“地质灾害”。1987年,我国陕西省有关部门创办了《灾害学》杂志。滑坡,特别是高速滑坡,有时会剧烈而迅猛地发生,是灾难性地破坏地质环境或工程地质环境的一种重大地质灾害。它速度快,冲量大。有些高速滑坡的滑移方量巨大,滑动距离很远。滑坡常摧毁工程,破坏房屋,中断交通,毁坏农田,堵塞江河,冲垮桥涵;有时能造成毁灭性的灾难,人员伤亡惨重,给经济-工程活动带来严重危害或威胁。长江三峡干流航道上的鸡扒子滑坡和新滩滑坡,黄河龙羊峡水电站库区的龙羊滑坡和查纳滑坡,甘肃东乡洒勒山滑坡,以及其它大型滑坡等,所造成的经济损失和用于勘测研究、预防治理等所耗费的资金,均以亿万元计。陕西省汉中地区,1981年秋天,在特殊的气候条件下,发生了数以万计的崩塌、滑坡与泥石流,加上洪水灾害,造成的经济损失竟高达10亿元之巨;伤亡情况,尚难详查。因此,近年来,全国各地有关部门,都对滑坡进行了研究和调查,给予了极大的关注。我国陕西省首先成立了主管滑坡工作的机构,甘肃、四川、上海、陕西等省市已成立了专门的滑坡研究学术团体。加拿大、美国、日本等国都曾专门组织过多次国际性滑坡学术会议。

滑坡研究,沿革已久;高速滑坡研究,也已数十年。一般地说,大都按静力学观点和理论,以滑坡的形成条件、营力因素、滑体结构、滑面尺寸为依据,对滑坡进行勘测和防治。这是无可非议的,实践结果也常是成功的,达到了保护或提高地质环境或工程地质环境质量的预期目的。然而,不可讳言,对某些斜坡环境中遭到滑坡破坏的地方,本可不必进行专门的地质测绘、勘探、试验,也不需耗费巨大资金进行专门治理和监测,只要根据由斜坡环境中滑体的发生、滑移、解体、运行、停滞、消亡,以至更新斜坡等所构成的滑坡动力学的观点和理论,仅进行一般性的勘测和局部的整理,或建立必要的斜坡环境的管理制度,便能够保障斜坡环境的安全与稳定,甚至会更能提高斜坡环境的质量。实践证明,在有些情况下,虽然进行了投资惊人的专门而复杂的研究、治理和监测,但尚不能彻底制止滑坡危害的继续。国内外都出现过这种本可避免的额外浪费,实属惋惜。鉴此,应该感激不少同行故旧,特别是中国科学院孙广忠研究员、地质矿产部地质科学院地质力学研究所与地质矿产部环境地质中心胡海涛研究员、西安地质学院已故刘国昌教授、成都地质学院张倬元教授等给予著者以很大的启示和鼓励,促使著者在原有滑坡研究的基础上,开始大力开展“滑坡动力学”的研究。1986年6月在宜昌召开的中国第一次“我国典型滑坡实例学术会议”和1987年4月由地质矿产部主持的“中国西南西北灾害山区斜坡稳定性研究”“六五”科研专报的评审会议认为,应将“滑坡动力学”的研究作为一项重大课题

或方向提到滑坡研究的日程上来；同时，国外也出现了相同观点。1988年，著者曾出版了我国首部与“滑坡动力学”密切相关的“动力滑坡学”。这是祖国“四化”建设在经济-工程和环境质量保护方面对地质科学中滑坡研究的客观需要和实际推动的有力佐证，也是地质科学在滑坡研究方面的必然发展。在此基础上，著者总结了自己数十年来以动力学观点为基础研究滑坡的一系列成果，并引用了大量新资料，阐明了许多新观点，提出了某些新理论，发现了不少新问题，从而倡导并系统地论证了斜坡形成与演化过程中滑体的发育、滑移、解体、运行、停滞、消亡，以至更新斜坡等出现的一系列动力学规律，推出本专著“滑坡动力学”。

本专著从理论上提出并论述了有关“滑坡动力学”的二十余项关键性理论、观点和问题，即滑坡营力因素的历史转化性、滑坡动态阶段的差异性、滑坡形成位置的选择性、坡基型剧动式滑坡的功能均衡与滑体的超稳功能、坡基型剧动式滑坡的滑体超稳性与其“复活”的条件特殊性、高速滑坡的多级冲程与多序次、高速滑坡的启程剧动与行程高速的机理、多冲程滑坡功能转化与滑体稳定性向量问题、多冲程滑坡的超前溅泥气浪与边缘旋流、滑坡危岩体弹性应变能的聚集、高速滑坡启程弹冲速度、弹冲剧动式高速滑坡的行程速度、缓动式低速滑坡的发育模式、缓动式低速滑坡的滑移机理与低速机理、缓动式低速滑坡的时空演化、采空变形的山坡滑移复合机理、地质环境中斜坡破坏的变异等。地质矿产部地质环境研究所文宝萍硕士、广东省水电厅总工办公室林叔中硕士、西安地质学院毛延龙硕士与赵法锁讲师、西安公路学院张珂硕士，参加了专题研究和编著的有关工作。

本专著可供工程地质、水文地质、环境地质、灾害地质及土木、建筑、水电、水运、铁道、公路、矿山、环境等学科的高等教育、科学研究、勘测设计和施工管理诸部门的有关师生、研究人员与工程技术工作者参考。

本专著是承担陕西省滑坡工作办公室科研项目的理论性成果，是国内外出版的首部《滑坡动力学》，形成了具有系统理论内容的地质领域中的新学科。它能与读者见面，应感谢陕西省滑坡工作办公室、西安地质学院科研处及陕西省环境科学研究单位的大力关怀和支持。孙建中、马守信、宋立胜、魏喜珂等专家曾对本专著提出过有益的建议；许多同志也曾协助过本专著的出版，在此均表谢忱。

本专著虽概括地提出和论述了“滑坡动力学”的二十几项关键性的理论、观点和问题，但对其全面而系统的研究，显然还有待于进一步扩展和深入地开拓，予以补充、丰富、完善、深化、更新和再发现。著者限于水平，不当之处，恳望指正。

著者

1993年夏于西安地质学院

目 录

序	
绪 言	1
第一章 滑坡基本问题	胡广韬 4
第一节 滑前坡体应力与变形	4
一、滑前坡体应力特征	4
二、滑前坡体的变形	6
第二节 坡体破坏的基本类型	10
一、崩塌	10
二、滑坡	11
三、滑塌	15
第三节 滑坡的动力学类型	16
一、滑坡的动力学分类	16
二、高速、剧动式高速滑坡与低速、缓动式低速滑坡	18
第二章 滑坡发育动态	胡广韬 23
第一节 滑坡营力因素的历史转化	23
一、塍边滑坡营力因素和原因	24
二、塍边滑坡营力因素的“历史转化性”分析	24
第二节 滑坡形成位置的选择	27
一、滑坡形成对凸坡地形的选择	27
二、滑坡形成对地质构成的选择	29
第三节 滑坡动态的阶段差异	30
一、滑坡动态的概念	30
二、滑坡动态的阶段性的	31
三、滑坡动态阶段性的实例	33
第三章 坡基型剧动式高速滑坡	胡广韬、张 珂 36
第一节 高速滑坡全程动力学机理	36
一、高速滑坡全程动力学机理的涵义	36
二、高速滑坡启程剧动机理	37
三、高速滑坡行程高速机理	40
四、高速滑坡终(全)程减速机理	42
第二节 坡基型剧动式高速滑坡的功能均衡与滑体超稳功能	43
一、坡基型高速滑坡剧动的关键	44
二、坡基型高速滑坡滑动过程的功能均衡关系	46
三、坡基型高速滑坡滑体功能均衡的两种情况	47
四、坡基型高速滑坡滑动停止后的超稳功能	50
第三节 坡基型高速滑坡的滑后滑体超稳性与其复活条件的特殊性	52

一、坡基型高速滑坡的滑后滑体的超稳性	52
二、坡基型高速滑坡的滑体“复活”条件的特殊性	54
第四节 坡基型高速滑坡滑体超稳性实例分析	55
一、坡基型高速滑坡滑体超稳性的选定模式	55
二、坡基型高速滑坡滑后滑体超稳性演化分析	56
第四章 高速滑坡启程剧动与行程高速	胡广韬、毛延龙 60
第一节 问题提出与分析现场的选定	60
一、问题的提出	60
二、滑坡危岩体现场的地质背景	60
三、危岩体斜坡的崩滑历史及现状	63
第二节 滑坡危岩体应力分布与可能滑床面的确定	65
一、滑坡危岩体计算模式的建立	65
二、滑坡危岩体应力分析	66
三、滑坡危岩体可能滑床面的确定	68
第三节 滑坡危岩体弹性应变能的聚集	71
一、滑坡危岩体锁固段形成	71
二、滑坡危岩体锁固段位移	72
三、滑坡危岩体锁固段应变能	74
第四节 高速滑坡启程弹冲与弹冲速度	75
一、滑坡危岩体弹性应变能转化——启程弹冲	75
二、滑坡危岩体启程弹冲速度的分析	76
第五节 弹冲剧动式高速滑坡的行程高速	77
一、弹冲剧动式高速滑坡行程速度分析	77
二、弹冲剧动式高速滑坡对其下环境的危害	79
第六节 弹冲剧动式高速滑坡研究的讨论	81
第五章 多级冲程高速滑坡	胡广韬、赵法锁 84
第一节 问题的发现	84
第二节 高速滑坡的多冲程与多序次	87
一、石家坡滑坡的多级冲程	87
二、石家坡一“场”滑坡的三个“序次”	92
三、多冲程高速滑坡形成条件及其危害的特殊性	93
第三节 多冲程高速滑坡的功能转化与滑体稳定性	94
一、多冲程高速滑坡的功能转化	94
二、多冲程高速滑坡的滑体稳定性向量问题	99
第四节 多冲程高速滑坡的超前溅泥气浪与边缘旋流	101
一、多冲程高速滑坡的超前溅泥气浪	101
二、多冲程高速滑坡的滑体边缘旋流	103
第六章 缓动式低速滑坡	胡广韬、文宝萍 105
第一节 缓动式低速滑坡的提出与典型地区的选定	105
第二节 缓动式低速滑坡的发育	110
一、铜川铝厂与劳保商店的缓动式低速滑坡	110

二、缓动式低速滑坡的发育模式	116
第三节 缓动式低速滑坡的滑移动力学机理	117
一、缓动式低速滑坡的缓动机理	117
二、缓动式低速滑坡的低速机理	119
第四节 缓动式低速滑坡的演化动态	122
一、缓动式低速滑坡的时间演化趋势	122
二、缓动式低速滑坡的空间演化趋势	129
三、缓动式低速滑坡的时、空演化趋势间的关系	130
第七章 斜坡环境的动力变异	胡广韬、林叔中 132
第一节 采空变异的顺向缓倾构造山体侧向的复合滑移	132
一、问题提出与分析模式的选定	132
二、采空影响顺向缓倾构造山体复合应力场的变化	137
三、采空影响顺向缓倾构造山体的复合变动的实验	140
四、采空影响下山体侧向变动的复合机理分析	143
第二节 斜坡环境中滑坡变异	146
一、问题的发现	146
二、地区斜坡破坏的基本形式	148
三、地区斜坡破坏的异常变化	149
四、地区斜坡破坏的异常变化对环境的影响及危害	151
参考文献	155
英文目录	157
英文简介	159

绪 言

斜坡,包括天然斜坡和人工开挖的边坡,是在地壳表部的天然地质和工程地质的作用范围内,具有露天侧向临空面的地质体,是广泛分布于地表的一种地貌形态。它的存在形式和演变,与人类生产、生活及生存发展活动,即与经济-工程活动有着极为密切的关系。正是由于斜坡的出现和存在,大地才环山抱水,奇峰秀峦;也正是由于斜坡的制约,才有千差万别的工程修建在斜坡上或斜坡附近,各种经济活动才在斜坡上广泛展开。因此,斜坡又是以人类从事生产、生活与生存发展活动为中心的周围一定空间内的客观地质体,即地质环境中重要的构成部分或要素。在此意义上,斜坡正是一种环境要素,可称之为“斜坡环境”。斜坡具有一定的坡度和高度,并在重力和其它地质营力作用下,不断地发展变化着。天然界的山坡、谷壁、河岸、湖海之滨等各种斜坡之形成,正是这些地质营力作用的过程和结果。人类的工程-工程活动也经常开挖出许多人工边坡,如路堑、运河、渠道、船闸、溢洪道边坡,以及房屋基坑和露天采矿场边坡等。斜坡自其形成起,便使岩土体的内部原有应力状态发生变化,出现坡体应力的重新分布,主应力方向发生偏移,应力犹有集中与消散;而且,这种应力状态又在天然营力及人类工程活动的影响下,随着斜坡的演变在不断地变化着,使斜坡岩土体发生不同形式的变动,即变形与破坏。不稳定的斜坡,在其岩土体本身重力、水、震动力及其它因素作用下,常常发生具有危害性的变形与破坏,导致交通中断,江河堵塞,塘库淤填,甚至酿成巨大灾害,如工程溃决和村镇埋没等。斜坡的失稳破坏,莫过于滑坡。它一般规模大,范围广,强度高,速度快,常导致惨重损失。因此,滑坡研究一向被广泛关注。

滑坡(Slide; Landslide),又称之为地滑或地垮,已早被熟知。近年来,由于高速滑坡使某些工程建筑物遭到了极为严重的毁灭性破坏,更引起广泛地关注。随着滑坡研究的逐渐深入,60年代就提出了滑坡的剧烈启动(剧动)问题。目前,又发现并提出了高速滑坡的多级冲程问题。因此,动力滑坡学近来被有关研究者强调地提出来,并已经获得一些可喜的成果。

滑坡研究,已约有一个世纪的历史。地质学的出现,便意味着滑坡研究的开始。一般认为,地质学的奠基人,俄国应推罗蒙诺索夫(1711—1765),德国公认是魏尔纳(1750—1871),英国杰出学者为郝屯(Hutton, J., 1727—1797)。但是,系统地质学的出现,应该承认英国学者赖尔(Lyell, C., 1797—1875)的贡献。他在1833年第一次出版了著称于世的《地质学原理》一书;书中系统地概括了地球上所发生的一些主要地质作用。在地质学研究范畴内,起初把滑坡视为地下水地质作用的结果;而后,随着经济生产的发展,地质学相应发展分出不少学科,如岩石学、构造地质学、动力地质学、地貌学、水文地质学、特别是工程地质学,都涉及滑坡问题,才把滑坡视为斜坡重力作用的过程与产物。滑坡研究所涉及的领域还不仅如此。由于其理论意义与实际价值之重大,凡与地质学有关的学科(如地理学、环境学等),几乎都与滑坡研究有关。特别是在水电建设、工业与民用建筑、道路与水运交通建设、矿山开发及国防工程等方面都广泛开展了滑坡的调查、勘探与研究,

并对其发生与演化规律,以及应采取的相应防治措施等给予广泛地重视,进行了大量工作,取得了极为宝贵的经验和成果。

高速滑坡的研究,只是在20世纪60年代才被人们充分重视。在此之前,著名滑坡研究者,如萨瓦林斯基,Ф.Л.,尼范托夫,А.Л.,马斯洛夫,Н.Н.,波波夫,И.В.,巴甫洛夫,А.Л.,特拉斯克,Р.Д.,太沙基,К.,米勒,Л.等,尽管在研究中均涉及到不少高速滑坡实例,但都没有重视滑坡的高速滑动问题。在有些极为详尽的滑坡分类中,虽考虑到滑坡活动的动力特征(萨瓦林斯基,Ф.Л.与波波夫,И.В.以及尼范托夫,А.И.的滑坡分类等),但仅提到“一次滑动”、“周期地或不定期地大约在同一表面上的重复滑动”、“连续地滑动”等。虽谢苗诺夫,М.Л.提出过“崩塌式滑坡”,罗高金,И.С.提出过“崩塌滑坡”,但对滑坡速度或高速滑坡仍未明确地开展研究。应该承认,高速滑坡的研究,是在它对大规模经济-工程活动造成毁灭性危害或威胁的情况下,才被提到滑坡研究的日程上来的。这就是人们熟悉的1963年10月在意大利的瓦依昂特大滑坡(Vaiont Slide)发生之后,才陆续出现关于滑坡速度(高速)的专门性研究。瓦依昂特水库坝高267m。蓄水后,坝前库区的左岸山体,突然以高达25—30m/s的速度沿层面滑下,近3亿 m^3 岩土迅速充填水库,激起高达250m的涌浪(高出坝顶100m以上),使5000万 m^3 的库水漫顶溢出,渲泄而下,摧毁位于下游3km一带的一座城市和几个小村镇,死亡近3000人,在世界上被认为是一次沉痛的灾难。接着,席埃德格尔,А.Е.(Schiedegger, А.Е.)于1974年首次发表了《关于灾难性滑坡滑程与速度的预测》。我国水电工程界对这种滑坡研究反应强烈。水电部总工程师、中国科学院学部委员潘家铮于1980年在《建筑物的抗滑稳定和滑坡分析》中,提出了滑坡速度的计算公式。著者于1963年在《关中西部黄土塬边滑坡的基本规律》中,提到“剧动式滑坡”问题;继而在1980年又专门对“剧动式坡基滑坡的超稳性”进行了研讨,并提出其功能转化的关系式。近年来,我国发现并发生了许多规模巨大、危害惨重的高速滑坡,已经广泛被地矿、地理、地震以及其他各个经济建设部门,特别是水电、建筑、铁道、航运、城乡建设和环境保护部门的极大重视。在我国黄河上游龙羊峡水电站库区,曾发现在1943年农历正月初三傍晚发生的查纳大滑坡,滑体方量高达1.6亿 m^3 ,其水平滑距是世界上有文字记载的最长者,达2600m。对此,水电部投入了雄厚人力和物力,进行了专门研究。1983年3月7日,在甘肃省东乡县巴谢河谷发生的洒勒山高速滑坡,也著称国内外。滑坡方量达6000万 m^3 以上,水平滑距达800m。在长江及黄河中、上游岸边,近年也发生过不少方量大、速度高的大滑坡。

滑坡学或滑坡动力学,作为独立的学科或课题被提出来,仅仅是80年代近期的动议。尽管此前所有对滑坡的有关调查、勘探、研究的成果,都应归属于滑坡学的范畴之内,其中也有一些属于滑坡动力学的研究内容,但大多是零星的、局部的,或者仅仅是涉及而尚未形成独立学科。滑坡的全部研究史,除在特殊情况下,一般都主要集中对滑坡的形态、组成、结构、形成、演化,滑体稳定性的条件、因素和原因,以及对滑坡进行调查、勘探、预测预报和监测防治的探讨和研究。因此可以认为,国内外在开始重视高速滑坡的同时,便大力开展了滑坡动力学有关方面的研究,并逐步丰富了滑坡动力学研究的内容。成都地质学院张倬元教授在《工程地质分析原理》(1981年)一书中述及,他与刘汉超副教授及其他合作者协同水电部西北勘测设计院一起,对我国著名的龙羊峡水库库首斜坡和滑坡进行了研究,并首次提出了滑坡床面的累进性破坏与贯通的机理;在位于斜坡坡脚处向坡体内延

伸的平硐内，发现了斜坡破坏前期的可见长度大于60m的剪切滑移面，以及在斜坡破坏过程中滑坡床面累进破坏与贯通的斜坡变动体的现场原型。许多专家学者，如 佛 斯 干 格 尔 (Fussganger, E., 1976年)、贵迪森尼 (Guidicini, G., 1976年)、王兰生教授(1987年)、晏同珍教授 (1988年)，还有日本学者，都注意到暴雨对滑坡发生的重要作用。中国科学院地质研究所孙玉科研究员 (1983年)、地质科学院胡海涛研究员 (1984年)对磷矿山体崩滑机理及其运动方式提出了重要研究成果。中国科学院地质研究所王思敬研究员 (1989年)，专门研究了大型高速滑坡的全过程的能量分析，取得了新进展。上述都是滑坡动力学研究方面的重大发现。在60年代初期，著者便对陕西著名的引渭工程所遇到的滑坡进行了“坡基型剧动式滑坡”滑动过程中的“功能转化”及其滑体“超稳性”的研究；近年 (1980—1993年)又相继提出了“滑坡原因与因素的历史转化性”、“古老滑坡复活条件的特殊性”、“多级冲程剧动式高速滑坡”、“基岩滑坡的启程弹冲与行程高速”、“缓动式低速滑坡的机理与其发展趋势”、“采空影响变异的山体侧向滑移复合机理”以及“斜坡环境的破坏变异”等专门研究斜坡或滑坡的有关动力学问题，对滑坡形成、演化过程中的发育、滑移、解体、运行、停滞、消亡，以至更新斜坡出现之动力学规律进行了研讨。据此，将“滑坡机制或机理 (mechanism)”定义为：“具备一定特质本构的斜坡或坡体，在其所处的特定应力场或力系中所表现出的内在和外在的机械力，它们的相互有机联系并制约地变化或变裂而发生与发展之规律”，从而累积了滑坡动力学研究资料。与此同时，近年来还有不少滑坡研究者提出了滑坡动力学研究的新课题。1986年6月在湖北宜昌召开的“我国典型滑坡实例学术讨论会”的总结中，也建议在我国开展“滑坡动力学或滑坡运动学的研究”。根据上述可以认为，滑坡动力学这个新领域，“是对具有一定本构的斜坡坡体，在其所处的特定应力场或力系之中而表现有内在和外在的机械力，二者相互有机地联系并制约，着重研究滑体在形成演化的全过程中的发育、滑移、解体、运行、停滞与消亡，以至更新斜坡出现之动力学规律的新学科。本专著便是按这种观点，根据著者已经取得的研究成果，从理论上概括地提出、阐述、论证了有关“滑坡动力学”的二十几项关键性理论、观点和问题，综合成著。全著共七章：第一章，滑坡基本问题；第二章，滑坡发育动态；第三章，坡基型剧动式高速滑坡；第四章，高速滑坡启程弹冲与行程高速；第五章，多级冲程高速滑坡；第六章，缓动式低速滑坡；第七章，斜坡环境动力变异。

第一章 滑坡基本问题

第一节 滑前坡体应力与变形

一、滑前坡体应力特征

斜坡的变形与破坏，决定于坡体中的应力分布和岩土体的强度特性。了解坡体中应力分布特征，对认识斜坡变形与破坏机理很有必要；对正确评价斜坡稳定，制定切合实际的设计和整治方案皆有指导意义。但是，由于坡体通常是非均质、各向异性的介质，坡形也千差万别，在斜坡变形与破坏过程中又不断地改变着其应力状态，而这方面的试验研究尚不成熟，因此，仅作梗概讨论。

（一）斜坡成坡后的应力场

斜坡形成前，岩土体中应力场为原始应力状态。开挖成坡后，坡体质点便向坡面方向移动，应力重新调整，发生明显的应力重分布现象。根据已有的光弹试验资料，可以看出应力分布的一些特点：

（1）坡体中主应力方向发生明显偏转（图1—1）。坡面附近的最大主应力（ σ_1 ）与坡面近于平行，其最小主应力（ σ_3 ）与坡面近于正交；坡体下部出现近于水平方向的剪应力，而且总趋势是由内向外增强，愈近坡脚处愈强。向坡体内部逐渐恢复到原始应力状态。

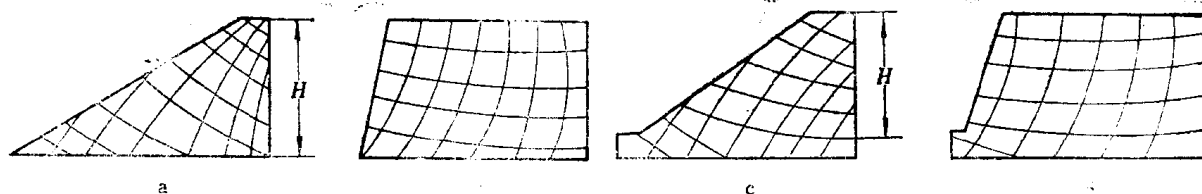


图 1—1 斜坡主应力迹线示意图（ $\sigma_r = 0$ ）

a— $\alpha = 30^\circ$, $W = 0$; b— $\alpha = 75^\circ$, $W = 0$; c— $\alpha = 20^\circ$, $W \geq 0.8H$; d— $\alpha = 75^\circ$, $W \geq 0.8H$;

σ_r —构造残余应力; α —坡角; W —谷底宽; H —坡高

（2）坡体中产生应力集中现象。坡脚附近形成明显的应力集中带；坡角愈陡，集中愈明显。坡脚应力集中带的主要特点是，最大主应力（ σ_1 ）与最小主应力（ σ_3 ）的应力差达到最大值，出现最大的剪应力集中，形成一个最大剪应力增高带。

（3）坡面的岩土体，由于侧向压力近于零，实际上变为两向受力状态；而向坡体内部逐步地变为三向受力状态。

（4）坡面或坡顶的某些部位，由于水平应力明显降低，可能出现拉应力，形成张力带（图1—2）。

实际上，斜坡应力分布远比上述复杂，还受多种因素的影响。

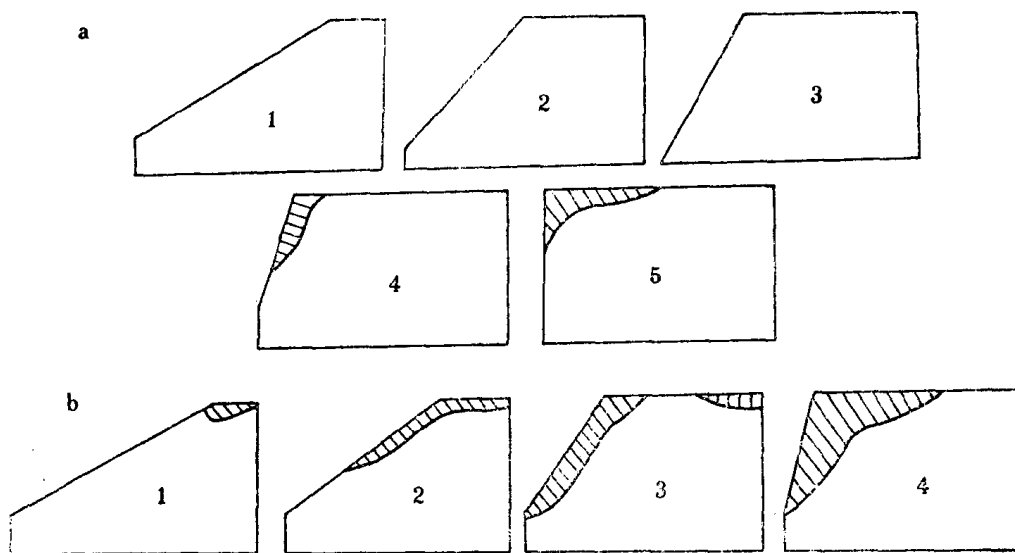


图 1—2 坡顶及坡面张力带示意图

a: $\sigma_r = 0$; b: $\sigma_r = 3\gamma H$; 1— $\alpha = 30^\circ$; 2— $\alpha = 45^\circ$; 3— $\alpha = 60^\circ$; 4— $\alpha = 75^\circ$; 5— $\alpha = 90^\circ$;
 σ_r —残余应力; γ —容重; H —坡体高度
 (阴影部分为张力带)

(二) 影响斜坡应力分布的主要因素

斜坡形成后, 其应力分布主要受原始应力状态、坡形和岩土体结构特征的影响。

斜坡应力的特征, 首先取决于未被开挖前岩土体的原始应力状态。任何斜坡都毫无例外地处于一定历史条件下的地应力环境之中, 特别是在新构造运动强烈的地区, 往往存在较大的水平构造残余应力 (σ_r)。因而在这些地区斜坡岩体的临空面附近常常形成应力集中, 主要表现为加剧应力分异现象。这在坡脚、坡面及坡顶张力带表现得最为明显(图1—2, b)。研究表明, 水平构造残余应力愈大, 其影响愈大, 二者呈正比关系; 与自重应力状态下相比, 斜坡变形与破坏的范围增大, 程度加剧。

坡面几何形态是影响坡体应力分布的主要因素。表示坡面几何形态的主要要素是坡角。坡角增大时, 坡顶及坡面张力带的范围扩大(图1—2); 坡脚应力集中带的最大剪应力也随之增高(图1—3)。谷底岩土体将因谷坡岩土体向下滑移的趋势而呈挤压状态, 应力增高, 变形加剧。谷坡的这种状况主要表现在坡脚附近。当谷底宽度(W)大于0.8倍坡高(H)时, 这种影响便减弱(图1—4)。此外, 凹坡使沿坡面走向的水平压应力(中间应力)增强; 凸坡则水平压应力削弱, 或出现拉应力。前者利于坡体稳定, 而后者则相反。可见, 陡坡与缓坡, 窄谷斜坡与单面斜坡, 凸坡与凹坡, 前者比后者较易变形与破坏。

斜坡变形与破坏的首要条件, 在于坡体中存在着各种形式的脆弱结构面; 其影响尤以岩质斜坡为著。斜坡岩土体的结构特征对坡体应力场的影响相当复杂。其主要表现是, 由于岩土体的不均一和不连续, 沿脆弱结构面周边出现应力集中或应力阻滞现象。因此, 它构成了斜坡变形与破坏的控制性条件, 从而产生不同类型的斜坡变形与破坏的机理。试验表明, 坡体中平缓脆弱结构面的上盘应力值较高; 下盘应力值较低; 而软硬两种岩土体界面处, 硬侧应力值急剧增高。可见, 坡体中结构面的存在, 使斜坡应力不连续。

斜坡中脆弱结构面周边应力集中的特征, 主要取决于脆弱结构面的产状与主压应力的

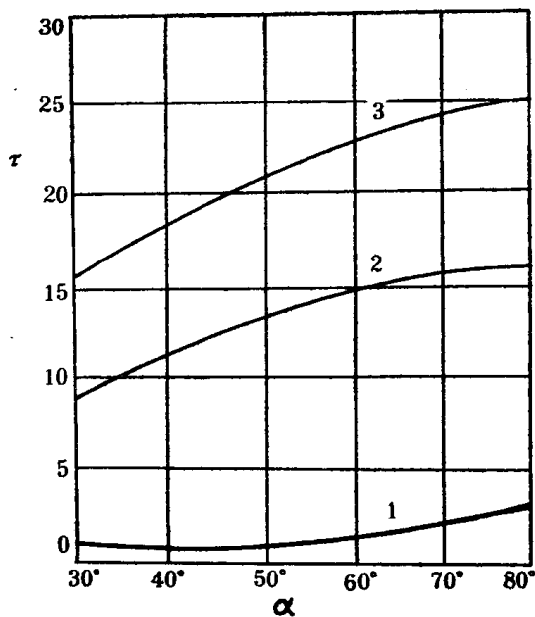


图 1—3 坡角对坡脚最大剪应力影响

1— $W \geq 0.8H$, $\sigma_r = 0$; 2— $W \geq 0.8H$, $\sigma_r = 3\gamma H$;
3— $W = 0$, $\sigma_r = 3\gamma H$; W —谷底宽; H —坡高

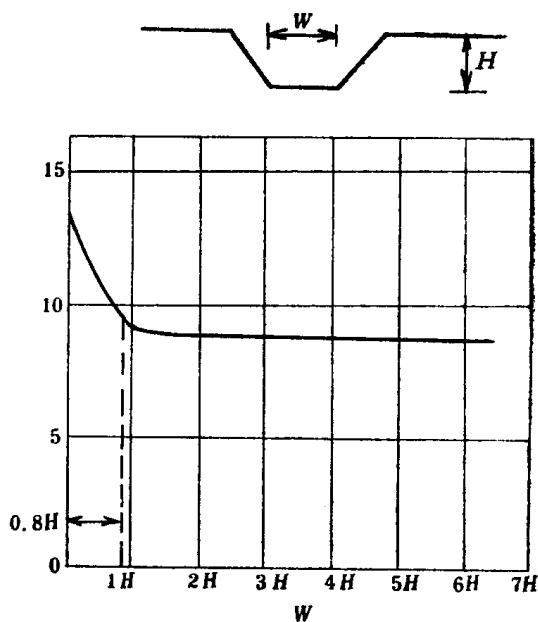


图 1—4 谷底宽度对坡角最大剪应力影响

关系。脆弱结构面与主压应力平行时，将在结构面端点部位或应力阻滞部位出现拉应力和

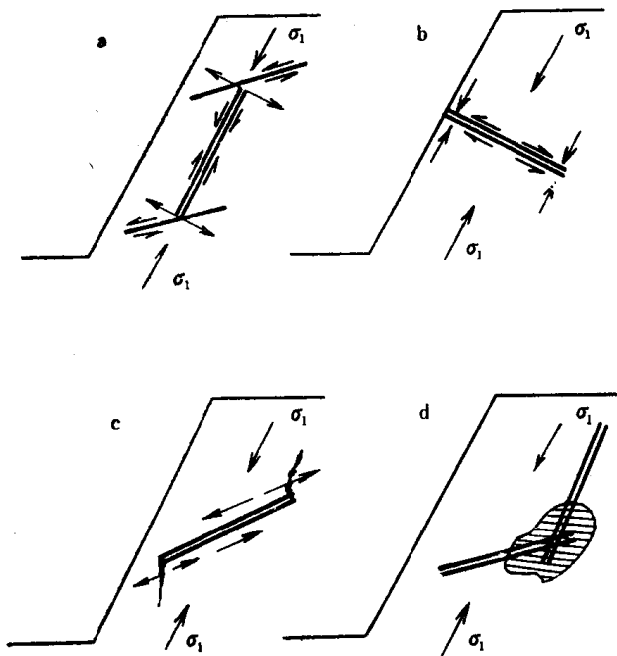


图 1—5 坡体脆弱结构面周边应力集中示意图

a— σ_1 平行脆弱结构面; b— σ_1 垂直脆弱结构面; c— σ_1 斜交脆弱结构面; d—脆弱结构面交汇处

剪应力的集中，出现向脆弱结构面两侧较远处发展的张裂（图1—5，a）。脆弱结构面与主压应力垂直时，将发生平行于结构面方向的拉应力，或在端点部位出现垂直于结构面的压应力，有利于脆弱结构面压密和斜坡稳定（图1—5，b）。脆弱结构面与主压应力斜交时，结构面周边主要为剪应力集中，并于端点附近或应力阻滞部位出现拉应力。顺坡脆弱结构面与主压应力呈 30° — 40° 交角，将出现最大的剪应力与拉应力值，对斜坡稳定十分不利（图1—5，c）。坡体易沿脆弱结构面发生剪切滑移，同时可能出现折线型蠕滑裂隙系统。在脆弱结构面相互交汇或转折处，形成很高的压应力和拉应力的集中区，其变形与破坏常较剧烈（图1—5，d）。

二、滑前坡体的变形

在斜坡形成的过程中，其原始应力重新分布，岩土体原有平衡状态也相应地发生变化。

在新的应力条件下,坡体将发生程度不同的局部或整体的变形与破坏,以达到新的平衡。自斜坡形成开始,坡体便处于不断的发展变化的总趋势中,首先变形,逐步发展为破坏。斜坡变形与破坏的发展过程,可以是漫长的,如天然斜坡的发展演化;也可以是短暂的,如人工边坡的形成与变化。斜坡变形与破坏的发生条件和影响因素相当复杂,但主要取决于坡体本身所具有的应力特征和坡体抵抗变形与破坏的能力大小。这两者的相互关系和发展变化,是斜坡演变的内在矛盾。可见,坡体内由于应力分异所出现的应力集中带中,有抵抗变形与破坏能力较低的脆弱结构面。它们在空间上能否构成不利于稳定的组合型式,则是以上矛盾发展变化的焦点。

(斜坡变形与破坏是斜坡演变的两大形式,前者以坡体中未出现贯通性破坏面为特点;后者是在坡体中已形成贯通性的破坏面,并以一定加速度发生位移为标志。变形与破坏是一个发展的连续过程,其间存在着量与质的转化关系。)近年来,岩体破坏机理及蠕变理论研究,已充分揭示了二者之间所存在的规律性,为斜坡稳定研究奠定了理论基础。因此,必须研究斜坡变形与破坏的整个过程,并重视这一演变过程中的变形研究。这对于定性地揭示坡体应力与结构强度的矛盾关系,鉴定现有条件下坡体的稳定状况,预测斜坡破坏的可能程度,都有重要意义。

斜坡变形以坡体未出现贯通性的破坏面为特点。但在坡体各个局部,特别是在坡面附近也可能出现一定程度的破裂与错动;而从整体看,并未产生滑动破坏,仅表现为松动和蠕动。

(一) 松动

在斜坡形成的初始阶段,坡体表部往往出现一系列与斜坡坡面走向(或坡顶缘线)近于平行的陡倾角张开裂隙。被这种裂隙切割的岩体,便向临空方向松开、移动。这种过程和现象称为“松动”。它也可以是一种斜坡卸荷回弹的过程和现象。

存在于坡体的这种松动裂隙,可以是在应力重分布中新生的,但大多是沿原有的陡倾角裂隙发育而成。它仅有张开而无明显的相对滑动。张开程度及分布密度由坡面向深处而逐渐减小。在保证坡体应力不再增加和结构强度不再降低的条件下,斜坡变形不会剧烈发展,坡体稳定不致破坏。

斜坡常有各种松动裂隙,实践中把发育有松动裂隙的坡体部位称为斜坡卸荷带或斜坡松动带。其深度通常用坡面线与松动带内侧界线之间的水平间距来度量。

(斜坡松动使坡体强度降低,又使各种营力因素更易深入坡体,加大坡体内各种营力因素的活跃程度。这是斜坡变形与破坏的初始表现。因此,划分松动带(卸荷带),确定松动带范围,研究松动带内岩体特征,对论证斜坡稳定性,特别是在确定工程开挖深度或灌浆范围时,都具有重要意义。)

斜坡松动带的深度,除与坡体本身的结构特征有关外,主要受坡形和坡体原始应力状态的控制。显然,坡体愈高、愈陡,地应力愈强,斜坡松动裂隙便愈发育,松动带深度也便愈大。

(二) 蠕动

斜坡岩土体在以自重应力为主的坡体应力长期作用下,向临空方向缓慢而持续的变形,称为斜坡“蠕动”。研究表明,蠕动的形成机理是,岩土粒间滑动(塑性变形)或沿岩石裂纹微错,或由岩体中一系列裂隙扩展所致,它是在应力的长期作用下,岩土体内部的一

种缓慢的调整性形变，实际上是趋于破坏的一个演变过程。坡体中由自重应力引起的剪应力，与岩土体长期抗剪强度相比很低时，斜坡只能减速蠕变；只有当应力值接近或超过岩土体长期抗剪强度时，斜坡才能加速蠕变。因此，斜坡最终破坏，总是要经过一定的蠕变过程，或短暂，或漫长。

斜坡蠕变大致可分为“表层蠕变”和“深层蠕变”两种基本类型。

1. 表层蠕变

斜坡浅部岩土体在重力的长期作用下，向临空方向缓慢变形而形成一“剪变带”。其位移由坡面向坡体内部逐渐降低，直至消失。这便是表层蠕变。

破碎的岩质斜坡及疏松的土质斜坡，表层蠕变甚为典型。在坡体剪应力还不能形成连续滑动面之前，会形成一剪变带，出现缓慢的塑性变形（图1—6）。据Q.扎留巴与V.门茨尔研究，密实粘土斜坡的这种剪应变，每米可达2.5cm。

岩质斜坡的表层蠕变，常称岩层末端“挠曲现象”，传统构造地质学中又称“伪构造”，系岩层或层状脆弱结构面较发育的岩体，在重力长期作用下，沿脆弱结构面错动和局部破裂而成的屈曲现象（图1—7）。

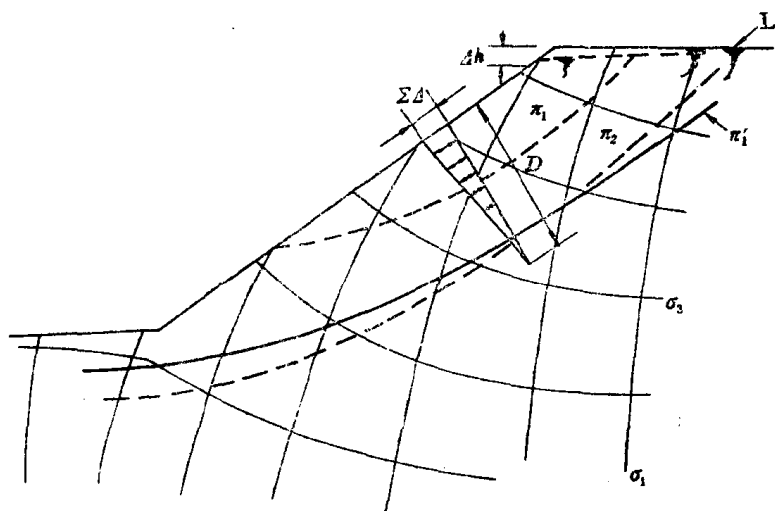


图 1—6 斜坡应力分布与剪变带（据Q.扎留巴，V.门茨尔）

σ_1, σ_3 —主应力迹线； π_1 —可能滑动面； π_2 —最大剪应力迹线； $\Sigma\Delta$ —坡面变形量； Δh —坡顶沉降量； D —剪变带厚度； L —张裂隙

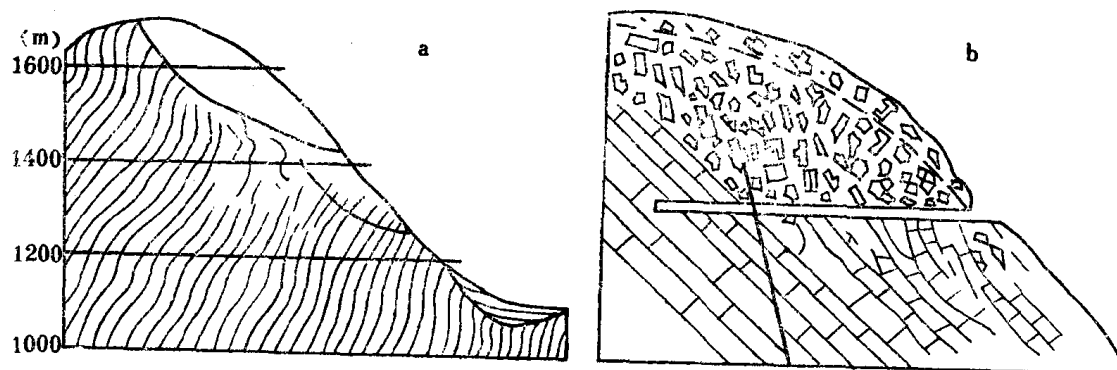


图 1—7 岩质斜坡表层蠕变

a—阿尔卑斯山谷反倾岩层的蠕变；b—湖南五强溪板溪群轻度变质砂岩、石英岩和板岩中的蠕变，深达40—50m

表层蠕动的岩层末端挠曲，广泛分布于由页岩、薄层砂岩或石灰岩、片岩、石英岩，以及破碎的花岗岩体所构成的斜坡上。脆弱结构面愈密集，倾角愈陡，走向愈近于坡面走向时，其发育尤甚。它使松动裂隙进一步张开，并向纵深发展，影响深度有时竟达数十米。

2. 深层蠕动

深层蠕动主要发育在斜坡下部或坡体内部。按其形成机理特点，深层蠕动有“软弱基座蠕动”和“坡体蠕动”两类。

当坡体基座产状较缓，且有一定厚度的相对软弱岩层时，在上覆层重力作用下，使基座部分向临空方向蠕动，并引起上覆层的变形与解体。这是“软弱基座蠕动”的特征。如软弱基座塑性较大，则坡脚主要表现为向临空方向蠕动、挤出（图1—8）；而当软弱基座中

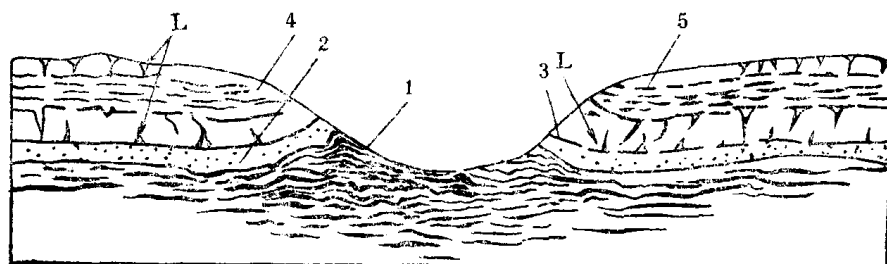


图 1—8 软弱基座挤出

1—粘土岩；2—砂岩；3、5—灰岩；4—页岩；L—张裂隙

存在脆性夹层时，它可能沿张性裂隙发生错位（图1—9）。软弱基座蠕动将引起上覆岩体变形与解体。上覆岩体中软弱层会出现“揉曲”，弹脆性岩层又会出现张性裂隙。当上覆岩体整体呈弹脆性时，则产生不均匀断陷，使上覆岩体破裂解体。上覆岩体中的裂隙由下向上发展，且其下端因软弱岩层向坡外牵动而显著张开。此外，当软弱基座略向坡外倾斜时，蠕动会进一步发展，使被解体的上覆岩体缓慢地向下滑移，而且可以被解体为岩块之间完全丧失联结的块体，如同漂浮在下伏软弱基座上。

坡体沿缓倾脆弱结构面向临空方向缓慢移动变形，称为“坡体蠕动”。它在卸荷裂隙较发育，并有缓倾脆弱结构面的坡体中，比较普遍（图1—10）。有缓倾脆弱结构面的岩体，又发育有其它陡倾裂隙，是构成坡体蠕动的基本条件。如缓倾脆弱结构面夹泥，则抗滑力很低，便会在坡体重力作用下产生缓慢的移动变形。这样，坡体必然发生微量转动，使转折处首先遭到破坏。这里首先出现张性羽裂，将转折端切断（切角滑移）；继续破坏，形成次一级剪面，并伴随有架空现象；进一步发展便会形成连续滑动面（滑面形成）。一旦滑面形成，其推滑力超过抗滑力，便

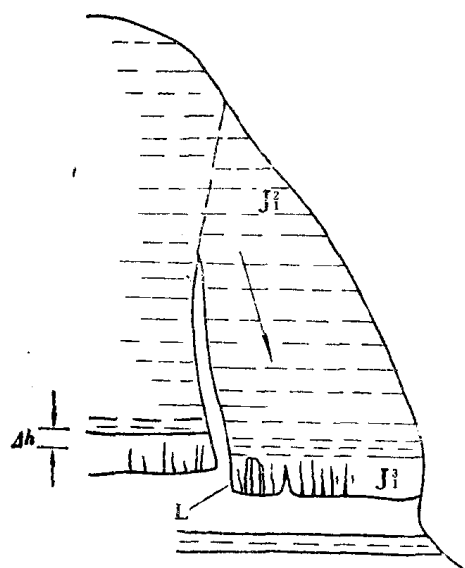


图 1—9 软弱基座蠕动引起上部脆弱岩层的张裂（四川某地）

J₁—煤系；J₂—砂岩；Δh—错距（50cm）；L—张性裂隙面

导致斜坡破坏，形成滑坡。

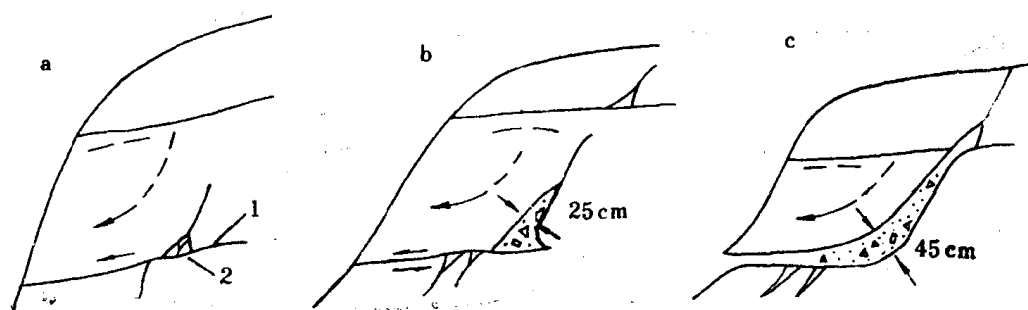


图 1—10 坡体蠕动

a—切角滑移；b—一级剪面开始形成；c—滑面形成；1—层面；2—羽裂

第二节 坡体破坏的基本类型

斜坡坡体中出现了与外界连续贯通的破坏面，被分割的坡体便以一定加速度滑移或崩落，脱离母体，称为“斜坡破坏”。

天然斜坡的形成过程往往比较缓慢，而坡体中应力的变化和附加荷载的出现却很迅速，使斜坡破坏可能出现不同情况。当迅速形成的坡体应力超过岩土体极限强度，足以形成贯通性破坏面时，斜坡破坏便急骤发生，斜坡破坏前的松动及蠕变变形的时间很短暂；反之，若坡体应力小于岩土体极限强度而大于长期强度时，斜坡破坏前总要经过一段较长时间的松动及蠕变变形过程。此外，自然营力因素对斜坡破坏的影响很大。某些营力（如地震力、空隙水压力等）突然加剧，可使一些原来并未明显松动及蠕变变形迹象的斜坡，也会突然破坏。斜坡破坏的形式很多，这里主要分述其基本类型，即“崩塌”、“滑坡”及“滑塌”。

一、崩 塌

斜坡前缘的部分岩体，被陡倾脆弱结构面分割，并以突然的方式脱离母体，翻滚而下，岩块互相冲撞、破坏，最后堆积于坡脚而形成岩堆。这种过程与现象称为“崩塌”。其规模相差悬殊，从大规模的山崩，直至小型块石的塌落（图1—11）。

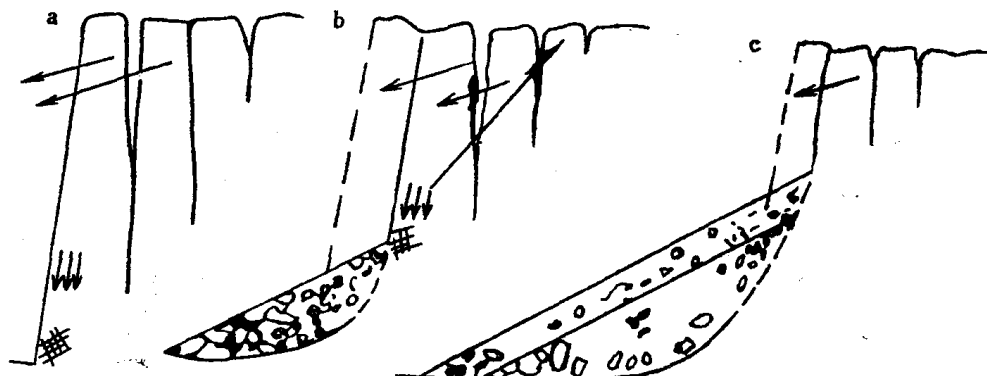


图 1—11 崩塌过程示意图

a—初始阶段；b—中间阶段；c—最终阶段