

基于PFC3D

黏性崩滑土体运动过程研究

季宪军 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

基于 PFC3D 黏性崩滑 土体运动过程研究

季宪军 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于 PFC3D 黏性崩滑土体运动过程研究/季宪军著. —武汉: 武汉大学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-307-19373-4

I. 基… II. 季… III. 土崩滑塌—运动机制—研究 IV. P642.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 132501 号

责任编辑: 孙 丽 杜筱娜

责任校对: 方竞男

装帧设计: 张希玉

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: whu_publish@163.com 网址: www.stmpress.cn)

印刷: 虎彩印艺股份有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 10.5 字数: 200 千字

版次: 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19373-4 定价: 68.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

黏性崩滑土体运动过程的研究属于山地灾害的基础性研究,对揭示崩滑-泥石流的演变机理以及泥石流灾害形成过程研究,泥石流规模、致灾范围预测等有着重要的意义,对保障国家重大建设项目的顺利实施具有重大的现实意义。

岩土体具有典型散粒体特征,由于颗粒与黏性填隙介质的运动力学机制复杂,以及影响黏性崩滑运动关键力学参数标定困难,因此对于黏性填隙介质对崩滑运动过程的影响(形态、速度和冲击力)的探讨较少。本书以离散单元为基础,采用崩滑土体细观参数与宏观运动现象相结合的方法,通过理论分析、模型实验、数值仿真,从细观角度分析颗粒间间隙介质的力学性质(黏结强度或黏滞系数)对崩滑土体运动过程的影响。本书侧重分析黏性崩滑土体运动机理及基于离散单元法的 PFC3D 在崩塌滑坡灾害运动过程研究中的应用,涉及物体接触碰撞、浆体(泥浆)粘连和流变等。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目:黏性碎屑流坡面运移动力过程研究(41672357);国家自然科学基金重点项目:南水北调西线一期工程区山地表层灾变过程与机理研究(40830742);河南省科技厅项目:中线调水工程水源区安全保障区失稳土体坡面运移动力过程研究(162102310253);河南省教育厅重点项目:南水北调中线调水工程水源区黏性碎屑边坡运移实验研究(15A410005)的资助,在此一并感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不足之处,欢迎广大读者批评、指正。

著 者

2017年4月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究背景和意义	(1)
1.1.1 崩滑土体运动形态	(1)
1.1.2 崩滑土体运动阶段	(9)
1.1.3 崩滑灾害与泥石流灾害关系	(10)
1.1.4 间隙介质崩滑土体运动过程	(11)
1.2 国内外研究现状与存在问题	(12)
1.2.1 崩滑土体调查、观测和实验研究	(12)
1.2.2 崩滑土体运动机理研究	(16)
1.2.3 崩滑土体运动过程理论研究	(16)
1.3 主要研究内容与方法	(24)
1.3.1 主要研究内容	(24)
1.3.2 研究方法	(25)
1.4 创新性研究成果	(26)
2 黏性崩滑土体运动力学分析与动力学模型导入	(28)
2.1 黏性崩滑土体模型概化与运动过程分析	(28)
2.2 颗粒在黏性填隙介质中运动受力分析	(30)
2.3 黏性崩滑土体动力学模型导入及关键参数	(32)
2.3.1 颗粒接触碰撞赫兹模型	(33)
2.3.2 PFC3D 颗粒粘连模型	(34)
2.3.3 影响黏性崩滑运动关键参数及确定方法探讨	(37)
2.4 小结	(39)
3 影响黏性崩滑土体运动关键参数确定	(40)
3.1 黏性填隙介质材料	(40)
3.1.1 填隙介质(泥浆)材料及其基本性质	(40)
3.1.2 实验试样制备及实验仪器	(43)



3.2	介质密度对切向受力性能影响	(44)
3.2.1	旋转剪切实验仪器与实验方案	(44)
3.2.2	黏性填隙介质剪切强度确定	(48)
3.2.3	剪切应力与剪切速率、含水率关系	(52)
3.2.4	填隙介质屈服应力与密度关系	(53)
3.3	黏性填隙介质密度对剪切刚度影响	(56)
3.3.1	动力黏度与剪切速率关系	(56)
3.3.2	黏性填隙介质剪切刚度确定	(58)
3.3.3	动力黏度与含水率关系	(59)
3.4	黏性填隙介质密度对法向粘连力影响	(62)
3.4.1	法向拉伸实验仪器及实验方案	(62)
3.4.2	法向粘连强度、刚度确定	(65)
3.4.3	法向粘连力与间距关系	(66)
3.4.4	法向粘连力和速率与间距比关系	(70)
3.4.5	介质密度对法向粘连范围影响	(72)
3.5	小结	(74)
4	黏性崩滑土体运动数值仿真	(75)
4.1	数值模型构建及参数设定	(75)
4.1.1	数值模型构建及检测颗粒设置	(75)
4.1.2	相关参数取值	(77)
4.2	内部颗粒运动特征	(79)
4.2.1	颗粒运动的阶段性	(79)
4.2.2	各阶段颗粒运动特征	(82)
4.3	介质密度对颗粒运动过程影响	(86)
4.3.1	介质密度对颗粒位置演化过程影响	(86)
4.3.2	介质密度对颗粒速度演化过程影响	(89)
4.4	介质密度对崩滑土体运动过程形态影响	(91)
4.4.1	无黏和黏性崩滑运动过程形态	(91)
4.4.2	各工况下黏性崩滑运动坡面形态	(99)
4.5	介质密度对崩滑运动冲击力影响	(105)
4.5.1	不同工况正面冲击形态	(106)

4.5.2 介质密度对障碍墙冲击过程影响	(106)
4.6 数值仿真程序	(110)
4.7 小结	(123)
5 黏性崩滑土体运动物理实验验证	(124)
5.1 实验模型、材料和方法	(124)
5.2 黏性崩滑土体坡面形态	(127)
5.2.1 运移过程正面形态	(127)
5.2.2 运移过程侧面形态	(129)
5.3 介质密度对坡面形态演化过程影响	(130)
5.3.1 坡面形态随时步变化过程	(130)
5.3.2 同一时刻崩滑运动坡面形态对比	(131)
5.4 介质密度对黏性崩滑运动过程影响实验分析	(133)
5.4.1 黏性崩滑运动位置与时间关系	(136)
5.4.2 黏性崩滑运动速度与时间关系	(136)
5.5 黏性碎屑流坡面运动过程数值模拟与检验	(137)
5.5.1 黏性泥浆影响下颗粒运动方程	(138)
5.5.2 黏性介质材料及关键参数确定	(138)
5.5.3 黏性碎屑坡面运动数值实验与物理实验模型对比	(140)
5.5.4 实验方法及实验结果对比与分析	(142)
5.6 小结	(145)
6 结论和进一步研究内容	(146)
6.1 结论	(146)
6.2 进一步研究内容	(147)
参考文献	(149)

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

岩土体的崩滑是山区最常见的山地灾害之一。它分布广、危害大,常给山区交通、能源、工矿、城镇和水利水电建设造成极大的危害,给国家和人民的生命财产造成巨大的损失。我国崩滑灾害分布十分广泛,遍布占国土面积 2/3 的山区,尤以中西部、西南部、西北部为盛。我国是世界上少数的几个崩滑灾害极为严重的国家之一。据统计估算,我国每年因崩滑灾害造成的经济损失在 10 亿元以上。崩滑灾害常制约山区经济发展和山区城镇规划及道路交通工程建设,影响国家发展战略的实施。比如国家南水北调西线工程项目,崩滑灾害防治成为该工程项目所必须解决的实际问题和南水北调西线工程能否顺利实施的关键问题之一。岩土体的崩滑灾害与泥石流灾害有着密切联系。据统计,大约 70% 的泥石流灾害是由崩滑土体演化而成。岩土体崩滑后沿坡面或沟道运动,使受灾范围随崩滑土体的运动而扩大,对所经区域造成严重破坏。崩滑土体因其组成复杂,结构构造存在差异而呈现不同的运动形态;某一运动形态下有着不同的运动阶段。崩滑土体运动过程的研究,特别是黏滞性崩滑土体运动过程的研究,对保障国家经济建设的顺利进行,以及国家重大建设的顺利实施具有重大的意义;黏滞性崩滑土体运动过程研究属于山地灾害的基础性研究,对揭示不同灾种(崩滑-泥石流)的演变机理以及泥石流灾害形成过程研究,泥石流规模、致灾范围预测等有着重要的意义。

1.1.1 崩滑土体运动形态

在众多山地灾害事件中,岩土体的崩滑灾害是最为常见的山地灾害形式。



崩滑土体因其组成差异和结构差异,有着不同的运动形式,主要有崩滑整体块状运动、崩滑-泥流运动、崩滑碎屑运动。

1. 崩滑整体块状运动

其主要包括结构完整岩体沿着软弱层面岩层滑动和结构性好的匀质土体沿破坏面的整体运动。此类崩滑灾害的主要特点是有着固定的滑动面,崩滑土体在整个运动和堆积过程中保持较好的整体性,常见新闻报道此类灾害事件的发生。

2006年3月30日下午,甘肃省永靖县盐锅峡镇盐集村附近的黑台发生山体滑坡。滑体长约400 m,宽约200 m,土方量约 $400 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图1.1)。根据观测与水文地质勘察,在地质构造上黑台属黄河Ⅳ级基座阶地,其是高差达90~130 m的斜坡地形。由于塬上长期灌溉浇水,这些水渗入黄土层,在到达白垩系泥质砂岩层时无法渗透,便在黄土层与白垩系泥质砂岩层的接触面上积聚起来。下层的黄土与水混合软化,当水积聚到一定程度,在重力作用下,山体就会开始在塬边上出现崩滑。

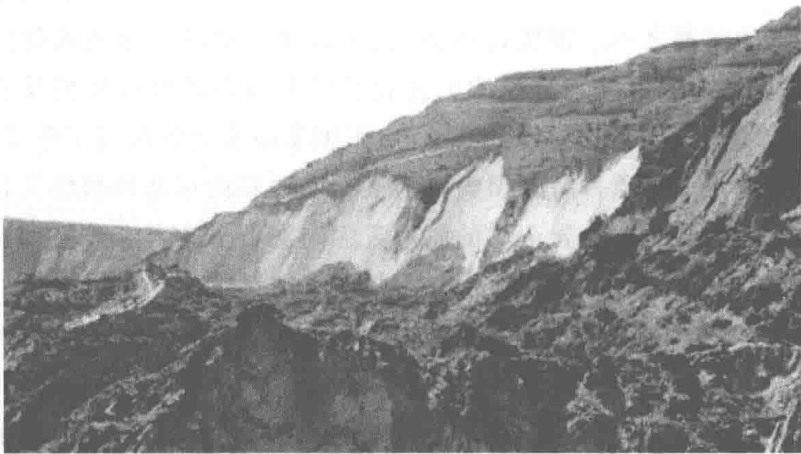


图 1.1 黑台发生山体滑坡

2010年3月10日凌晨,陕西省子洲县双湖峪镇双湖峪村石沟发生山体滑坡事故,崩塌土方量约 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$,事故造成44人被埋(图1.2)。

此外,成昆铁路铁西车站内1980年7月3日发生的滑坡是迄今为止发生在我国铁路史上最严重的滑坡灾害,被称为“铁西滑坡”。该滑坡位于四川省越西县凉山牛日河左岸谷坡上,滑坡体从长120 m,高40~50 m的采石场边坡下部

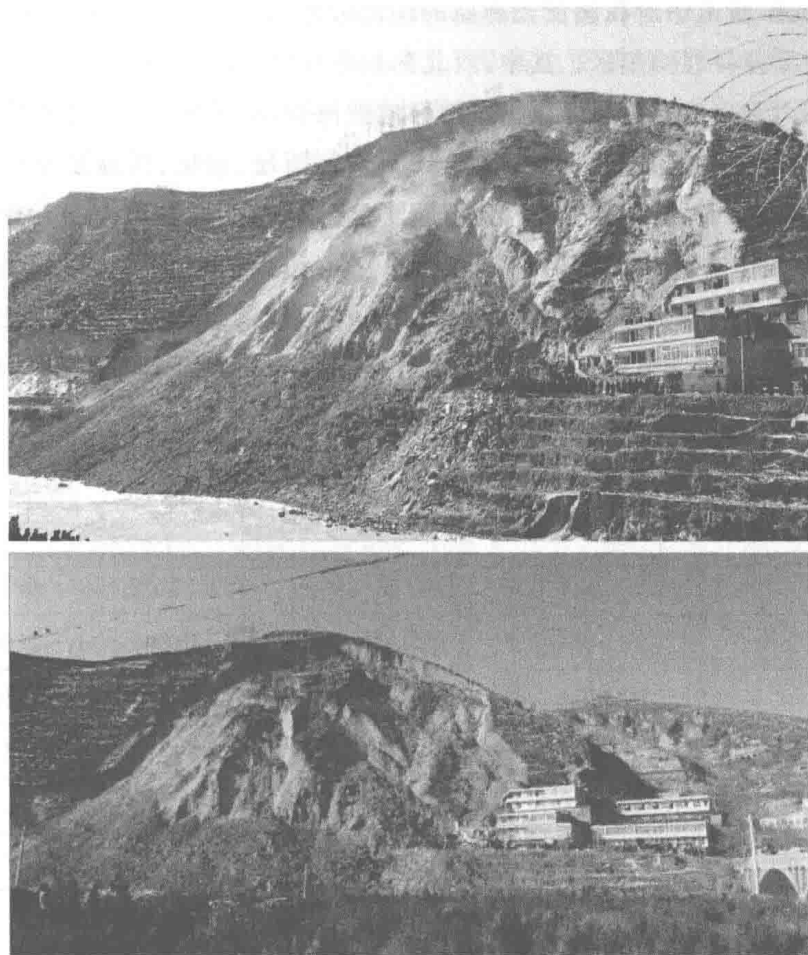


图 1.2 双湖峪村石沟山体滑坡

剪切滑出。剪切口高出采石场坪台和铁路路基面 10 m。滑坡体填满采石场后,继续向前运动,掩埋铁路涵洞、路基,堵塞铁西隧道双线进洞口,堆积在路基上的滑坡体厚达 14 m,体积为 220 万立方米。越过铁路达 25~30 m,掩埋铁路长 160 m,中断行车 40 天,造成的经济损失仅工程治理费就达 2300 万元。1955 年陇海铁路总体积达 700 万立方米的卧龙寺滑坡将长 600 m 的一段铁路推出 230 m。

2. 崩滑-泥流运动

此类灾害多发生在土质组成相对均匀的地区,如黄土地区的泥流或火山灰堆积区火山灰泥流。连续降雨条件下,土体饱和,在重力或外荷载作用下运动,饱和土体或火山灰随即演变为泥流。



雷祥义、黄玉华对我国黄土高原的泥流分布特征做了详尽的描述。黄土高原泥流主要发育在沟壑区。其中,西北部梁峁黏性泥流分布区包括六盘山以西梁峁区和六盘山以东梁峁区。这些地区植被稀少,土质疏松,沟壑纵横,地形破碎,沟谷深切,谷坡陡立,坡度一般为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$,滑坡、崩塌、泻溜发育,暴雨次数多且强度较大,各条大小沟谷内无不暴发泥流,且多为黏性泥流。一般说来,崩滑-泥流多发生在树叶状沟谷中,沟长为 $1 \sim 2 \text{ km}$,面积为 $1 \sim 5 \text{ km}^2$,谷坡坡度为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,沟床比降为 $0.20 \sim 0.04$ 。组成均匀的崩滑黄土为泥流形成提供丰富物质;强降雨或持续降雨与崩滑黄土混合形成泥浆,沿沟道运动形成灾害性的黄土崩滑泥流。黄土高原灾害性泥流见表 1.1。

表 1.1 黄土高原灾害性泥流

地点	时间	泥流性质	资料来源
兰州西固洪水沟	1964. 7. 20	黏性泥流	铁道部第一设计院
天水罗玉沟	1965. 7. 7	稀性泥流	铁道部第一设计院
天水伯阳菜子沟	1978. 7. 12	稀性泥流	天水伯阳乡观测
绥德韭园沟	1977. 8. 4	稀性泥流	王万忠(1982)
子洲团山沟	1968. 7. 15	稀性泥流	王万忠(1982)
子洲团山沟	1969. 5. 11	稀性泥流	王万忠(1982)

3. 崩滑碎屑运动

崩滑碎屑运动主要包括无黏崩滑碎屑运动和黏性崩滑碎屑运动。

(1) 无黏崩滑碎屑运动

在我国西部山区,存在大量的风化坡积土或结构破碎的岩体。风化坡积土由粗大颗粒与风化细颗粒组成的混合土体组成;破碎的岩体由岩石块体和软弱结构面组成,岩石块体由软弱结构面胶结,在无外界扰动的情况下,边坡积土或破碎岩土体稳定;在地震、冲刷或其他外界作用下,其沿着坡面运动。

无黏崩滑碎屑流多发生于结构破碎的岩体,结构破碎的岩体在运动过程中,因碰撞等使岩石块体从岩体分离,形成颗粒碎屑。颗粒碎屑沿着坡面或沟道形成碎屑流,碎屑在运动过程中有着频繁的相互碰撞作用。此类灾害在地震作用下最为常见。



汶川地震诱发大量的山体崩滑破坏,破碎的崩滑山体沿着坡面运动,经碰撞-破碎形成大量的崩滑碎屑流(图 1.3)。据国土资源部组织调查,发生的滑坡、崩塌、泥石流约 15000 处,同时新发现了地质灾害隐患点 4970 处,其中滑坡 1701 处、崩塌 1844 处、不稳定斜坡 1093 处。以崩塌、滑坡灾害最为严重,远远超过其他灾种。其中,北川县城王家岩滑坡导致 1600 人被埋死亡,数百间房屋被毁,是汶川地震触发的最严重的滑坡灾难,举世罕见。青川东河口滑坡-碎屑流是汶川地震触发的较为典型的高速远程复合型滑坡,滑动距离约

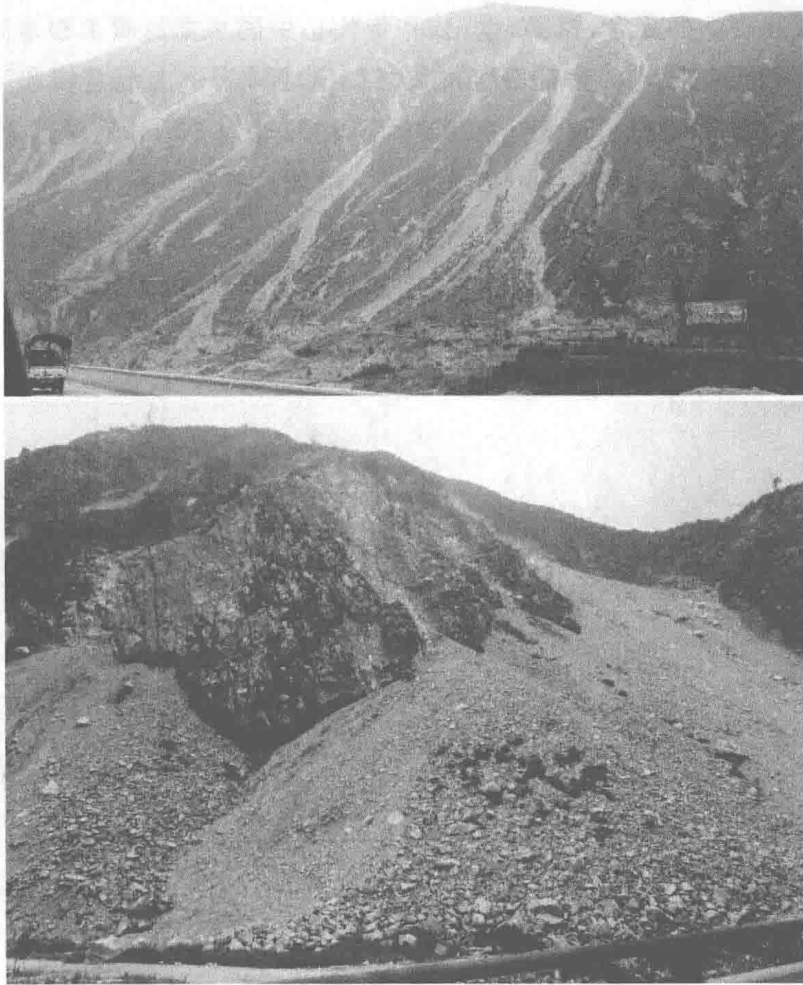


图 1.3 罗圈湾破碎岩体崩滑灾害:无黏崩滑碎屑流



2400 m, 高速碎屑流冲抵清江河左岸, 形成滑坡坝, 致使 7 个村庄被埋, 约 400 人死亡。

“5·12”地震引起北川老县城王家岩巨型滑坡。该滑坡体长 290 m, 宽 240 m, 厚 15 m, 面积 69600 m², 体积约 100 万立方米。滑坡体坡度小于 10°, 坡向 80°。滑坡体平面呈舌形, 剖面呈凹形。滑坡体岩性为碎石夹土, 碎石含量大于 50%, 结构零乱; 滑床推测为下寒武统超山组灰黄色变质砂岩、板岩; 滑面后部较陡, 坡度约 75°, 中部稍缓, 坡度约 35°, 前部平缓, 坡度小于 10°, 滑面埋深约 15 m, 滑面倾向为 80°。

“5·12”地震引起大型崩塌体淹没了北川中学。北川中学大型崩塌体为古滑坡和危岩体的复合, 据 20 世纪 90 年代初中国水文地质工程地质勘察院 909 队的调查资料, 该区为乱石窖滑坡区。滑坡母岩由上泥盆统和下石炭统厚层灰岩构成, 滑坡长 650 m, 宽 200 m, 平均厚度为 20 m, 最厚达 40 m, 前、后缘高差达 300 m, 体积约 240 万立方米。滑坡具有崩塌特征, 以块(巨)石为主, 巨石单体体积可达 1000 m³, 产生巨大冲击力, 导致北川中学新区三层高的一排教学楼和邻近建筑物被毁覆, 近 500 人死亡。图 1.4 所示为汶川地震后的北川县城。



图 1.4 汶川地震后的北川县城



1981年8月23日,位于汉江北岸直流冷水河上游4 km处石家坡,地形起伏大,相对高差400~800 m,形成峡谷深沟。主要岩性有变质岩、沉积岩和岩浆岩,左岸斜坡上近50万方岩土自925 m高处高速俯冲下滑,形成多冲程高速碎屑流。

1985年5月,湖北省秭归县新滩镇长江北岸属中厚层坡积层岸坡,从后缘至前缘堆积了崩积物,其物质成分主要是碎石、块石。此斜坡发生大滑坡,同时三游沟一带发生了体积大约为200万方的大规模碎屑流。

1994年4月30日,重庆市武隆县兴顺乡核桃坪村境内乌江左岸鸡冠岭-龙冠嘴发生了特大型崩塌滑坡—碎屑流—堵江灾害链。

国外也见此类灾害的发生,其中,瑞士Elm崩塌-碎屑流灾害引起国内外学者的广泛关注。该灾害的崩塌体积为100万立方米,崩落高差500 m,滑动距离1.15 km,死亡115人,破裂面后壁顶点至碎屑流堆积物最远点距离为2.2 km。

(2) 黏性崩滑运动

因长期降雨或暴雨条件,坡积物或破碎的岩体发生崩滑,崩滑土体在坡面运动过程中破碎,细颗粒土体与雨水混合形成泥浆,破碎的粗颗粒与泥浆混合沿坡面运动,之后于沟道堆积或形成泥石流沿沟道运动。此类崩滑灾害在运动过程中,不能忽略粗颗粒间的胶结物质和破碎后粗颗粒间的泥浆对运动过程的影响,把此类崩滑运动称作黏性崩滑碎屑运动。

1996年7月26日,辽宁省凌源市马头山沟,在多年内外地质营力和强降水等综合因素作用下,危岩体发生崩塌,并诱发坡面黏性泥石流地质灾害;2000年4月9日,西藏林芝地区波密县易贡藏布河发生巨型复合性高速滑坡,滑坡经历了高位滑动—碎屑流—土石水气浪—泥石流—次级滑坡等过程。

2008年11月2日凌晨,云南省楚雄彝族自治州楚雄市发生特大泥石流灾害,造成该市西舍路乡下辖的新华、保甸、岔河、朵苴4个村发生严重山体滑坡,其中新华村受灾最为严重(图1.5)。泥石流造成楚雄市15个乡镇,150个村,1975个村民小组,16万余人不同程度受灾,并造成21人死亡,39人失踪,17人受伤。

2010年6月12日,广西壮族自治区玉林市容县和岑溪县接壤地区发生



强降雨,降雨历时 11 h,降雨量大于 300 mm。该地区约 300 km² 区域范围内暴发群发型滑坡泥石流地质灾害数百处,造成人员伤亡者十余处,造成 43 人死亡。其中,容县有 30 人死亡,岑溪县有 13 人死亡,基础设施及房屋受到重大破坏或损毁。其中容县六王镇陈村滑坡造成 11 人死亡。该滑坡长 70 m,宽 50 m,平均厚度 2 m,体积约 7000 m³。滑坡顺坡而下冲毁房屋后墙,房顶随后砸下。



图 1.5 云南省楚雄市大竹林黏性崩滑碎屑流动

国外也常见此类山地灾害事件报道,如 1974 年 4 月 25 日,秘鲁发生 $1.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的曼特罗滑坡-流滑灾害,岩土崩塌后持续高速流滑 3 min,造成 451 人死亡。

崩滑土体所呈现的不同运动形态,取决于崩滑土体内部组成的物理力学性质。不同的运动形态有着不同的致灾方式和灾害后果。崩滑土体的运动形态决定着运动距离。其运动过程就是致灾过程,运动距离就是其致灾范围。崩滑土体组成的复杂性决定了其运动过程中运动形态的多样性。对崩滑土体运动过程的研究有助于揭示其多种运动形态的内在原因,根据崩滑土体的组成及其结构构造特征,初步判断崩滑灾害的运动形态,为其治理方案和工程布局等提供合理的建议。



1.1.2 崩滑土体运动阶段

对于由粗、细颗粒组成的坡积物或破碎岩块和软弱结构面组成的岩体的崩滑运动,根据粗颗粒间的相互作用差异,其复杂的运动过程有着不同的运动阶段。

在暴雨或持续降雨条件下,边坡堆积物或破碎岩体呈整体块状失稳,失稳块状崩滑土体因碰撞、挤压、剪切等作用破碎成粗颗粒与细颗粒组成的碎屑物质;在运动过程中,细颗粒与土体中的水或坡面积水或降雨快速混合成泥浆,泥浆与粗颗粒组成的混合物沿坡面运动;在重力作用下,粗颗粒与泥浆混合物运动至沟道,与沟道水混合形成泥石流。崩滑土体运动过程可划分为以下几个阶段:块状岩土体崩滑碰撞破碎、粗颗粒与泥浆混合运动、坡面或沟道堆积或形成沟道泥石流(图 1.6)。

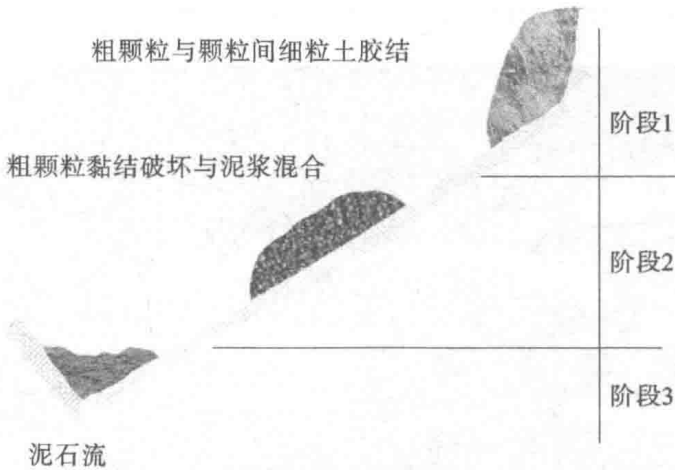


图 1.6 黏性崩滑土体坡面运动过程示意图

对于由粗、细颗粒组成的坡积物或破碎岩块和软弱结构面组成的岩体的崩滑运动,不同的运动阶段有着不同的相互作用机理。启动后的块状岩土体因碰撞而破碎、分散,产生大形变。其破碎、分散程度和形变取决于粗颗粒或块体间的黏结强度(胶结强度)。粗颗粒与泥浆混合运动过程中,粗颗粒与泥浆相互作用,泥浆性质影响崩滑土体的形态和速度,以及时间和空间的演化。粗颗粒与泥浆混合物进入沟道后,继续与沟道水流相互作用形成运动性更强的泥石流。分阶段研究崩滑土体运动过程有助于克服同一参数不足以描述整



个运动过程的缺陷,便于揭示崩滑土体运动过程形态演化机理——崩滑泥石流的形成机理。

1.1.3 崩滑灾害与泥石流灾害关系

岩土体崩滑和泥石流作为最为常见的不同种类的山地灾害,两者之间有着密切的联系。崩滑的岩土体堆积在坡面或沟道,为泥石流提供了大量的松散物质;或者崩滑土体在运动过程中破碎,粗颗粒与泥浆掺混在坡面混合运动,最后演变为泥石流。据泥石流源区调查分析发现,大约 70% 的泥石流是由崩滑土体演化而成的。

汶川地震后,地震造成山体崩滑,大量松散固体物质堆积坡面或沟道,为泥石流提供了大量的物源。2008 年 9 月 24 日开始的持续降雨,使北川县城附近多处山体产生滑坡和泥石流(图 1.7)。2010 年 8 月 17 日,四川绵竹清平乡发生特大泥石流(图 1.8)。

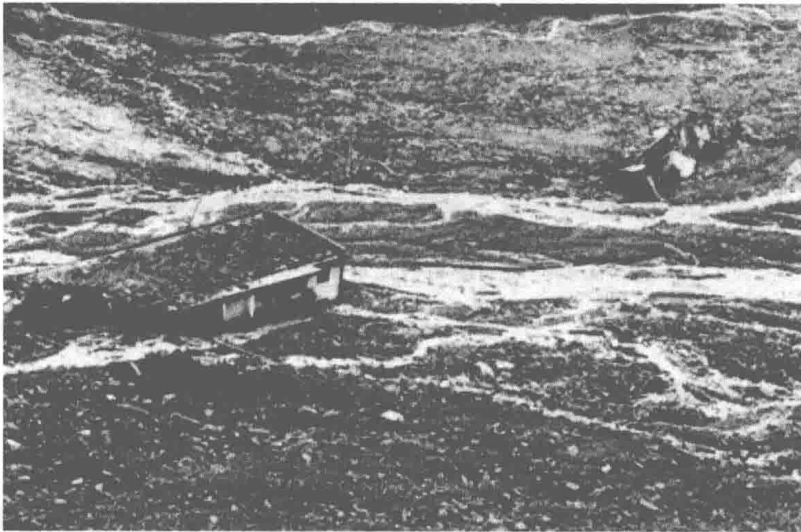


图 1.7 北川县城泥石流

据调查,舟曲特大泥石流发生前,三眼峪沟流域内共分布大、小崩塌 50 余处,总体积 $2829.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。三眼峪沟流域内滑坡共有 4 个,总体积 $94.9 \times 10^4 \text{ m}^3$;在三眼峪沟流域内一些较开阔沟段,有大量的崩滑沟道堆积物,总量达 $840 \times 10^4 \text{ m}^3$;流域内坡面残坡积物储量约为 $315 \times 10^4 \text{ m}^3$;危岩体总体积 $64.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。为舟