

清华大学研究生课程——《灾害学》

地质灾害

陆新征
清华大学土木工程系
2006

1

清华大学研究生课程——《灾害学》

内容提要

- 地质灾害的概念、类型及分布
- 火山地质灾害
- **滑坡地质灾害及其防治**
- 崩塌地质灾害及其防治
- 泥石流地质灾害及其防治
- 地面沉降及其防治
- 岩土工程灾害

2

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡灾害

- 斜坡上的岩土体由于种种原因在重力作用下沿一定软弱面整体向下滑动的现象叫做滑坡

3

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的构成

- 滑坡体
- 滑坡壁
- 滑动面
- 滑坡床
- 滑坡舌
- 滑坡裂缝

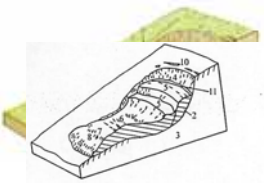


图 18-1 滑坡示意图
1—滑坡体 2—滑动面 3—滑坡床
4—滑坡壁 5—滑坡台阶 6—鼓胀裂隙 7—滑坡鼓丘 8—滑坡舌
9—扇形裂缝 10—后缘拉张裂缝 11—滑坡迹地

4

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡照片

- 滑坡体
- 滑坡壁
- 滑动面
- 滑坡床
- 滑坡舌
- 滑坡裂缝



5

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡照片



6



清华大学研究生课程——《灾害学》

20世纪中国滑坡灾害

| 时间 | 地点 | 面积/ [1×10 ⁴ m ²] | 死亡人数/ 人 | 备注 |
|-------------|---------|-----------------------------------------|---------|-------------|
| 1943.1.3 | 青海会岭 | 12000 | 123 | 塌崖河 15h |
| 1954.7.26 | 西南宁柳河 | 29900 | 487 | 塌地 4332 公顷 |
| 20 世纪 60 年代 | 贵州互助潘门桥 | 4800 | 200 | 崩塌堵塞 |
| 1961.3.6 | 肇庆 漠水桥 | 185 | 40 | 桥墩入土 |
| 1965.11.23 | 云南普安海 | 39000 | 484 | 塌内德决深 343 米 |
| 1974.9.04 | 四川南江白河溪 | 700 | 129 | 毁房 400 间 |
| 1982.6.3 | 湖北监利何矿 | 300 | 287 | 埋矿窑 |
| 1982.7.3 | 四川雅安 | 220 | | 成昆路中断 40 天 |
| 1983.7.17 | 四川南江鸭子 | 1500 | | 毁房 1730 间 |
| 1983.7.7 | 甘肃静宁 | 5000 | 220 | 埋 4 个村庄 |
| 1987.9.1 | 贵州苗族城关 | 7000 | 95 | 埋成土堡镇全部 |
| 1989.7.13 | 四川华蓥市渡口 | 300 | 221 | 毁矿山、机关 |
| 1991.9.13 | 云南昭通水潦河 | 2400 | 216 | 毁村寨、农田 |

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 对城镇的危害

自 1949 年以来,重庆市已发生几十次严重的滑坡、崩塌灾害。如 1985 年王家坡滑坡,造成 102 户居民被迫搬迁,并严重危及重庆火车站的安全;1986 年 7 月,向家坡、老君坡等数处滑坡活动,造成 16 人死亡,3 人重伤,多处房屋被毁;1989 年 9 月,李子坝滑坡复活,堵塞交通,并迫使数十户居民搬迁。1998 年 8 月中旬,重庆市巴南区麻柳壩镇和云阳县水乡大面村分别发生特大型滑坡灾害,500 户房屋全部被毁,1000 余人无家可归,直接经济损失超过 8000 万元。据最新调查资料,重庆市 201.59 km² 范围内,共有体积大于 500 m³ 的新、老滑坡 129 处,其中 66 处滑坡处于潜在不稳定或活动状态。

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 对铁路的危害

中国铁路沿线的滑坡、崩塌灾害主要集中于宝成、宝天、成昆、川黔、鹰厦、长杭、黔桂、枝柳、太焦、沈大等线路,滑坡、崩塌灾害约占全国山区铁路沿线地质灾害的 80% 以上,平均每年中断运输约 40 余次,中断行车 800 多小时,每年造成的直接经济损失约 7000 多万元。

1998 年 8 月中旬,刚刚正式通车 3 个月的达川至成都铁路的南充段发生 5 处山体滑坡,8 月 13 日距南充市 50 km 的大通车站前方的桥堡因滑坡而坍塌,路基塌方约 8000 m³,致使铁路运输中断行车 90 多个小时。因此山体滑坡和路基塌方,公路运输也严重受阻,水上运输被迫封航。

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 对公路的危害

山区公路不同程度地遭受滑坡、崩塌的危害,极大地影响了交通运输的安全。中国西部地区的川藏、滇藏、川滇西、川陕西、川陕东、甘川、成兰、成阿、滇黔、天山国防公路等十余条国家级公路频繁遭受滑坡、崩塌的严重危害。受灾最重的川藏公路每年因滑坡、崩塌、泥石流影响,全线通车日数不足半年。省级、县级、乡级公路上的滑坡、崩塌、泥石流灾害更是屡见不鲜。

2000 年 4 月 9 日,位于中国西藏林芝地区波密县境内的易贡藏布河孔木弄沟发生大规模的山体滑坡,形成长约 2500 m、宽约 2500 m、平均高约 60 m 的滑坡堆积体,面积约 5 km²,体积约 (2.8~3.0) × 10⁸ m³。致使波密县易贡、八盖两乡和易贡茶场与外界的交通中断,4000 多人被困。经确认,滑坡滑动距离约 8 km,高差约 3330 m。滑坡体堵塞了易贡藏布河 7 km 长的主河道,形成汇水面积达 1 万多平方公里的“湖泊”。至 6 月 10 日晚,“易贡藏布湖”累计水位涨幅达 35.94 m,容量达 30 多亿立方米。由于滑坡和泥石流物质土质疏松,导致“大坝”于 6 月 11 日凌晨溃决,使下游通麦大桥和两座吊桥被冲垮,通麦大桥至易贡茶场及排龙乡的公路全部被冲毁。此次山体滑坡为世界罕见,也是迄今为止中国发生的最大规模的山体崩塌灾害。



清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

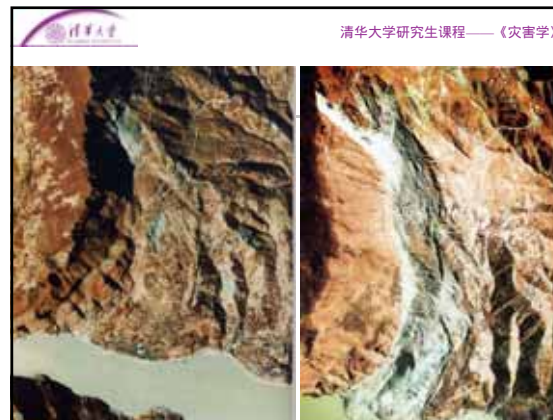
■ 对河道航运的危害

由于特殊的地形地貌,河流沿岸特别是峡谷地段多为滑坡、崩塌的密集发生段,对河流航运的危害和影响很大。号称黄金水道的长江是遭受滑坡、崩塌灾害最严重的河运航道。数十年来,因滑坡、崩塌造成的断航事故时有发生。

1982年7月18日云阳鸡扒子老滑坡复活,180×10⁴ m³土石滑入长江,河床增高30余米,江岸外移50m,在鸡扒子航段600m范围内形成三道“水坝”,严重阻碍了长江航运,仅清航整治费就达8000多万元。

1985年6月12日凌晨3点45分,位于长江三峡西陵峡峡谷段北岸的新滩镇发生了著名的新滩大滑坡。滑动物质约3000×10⁴ m³,其中200×10⁴ m³滑入长江。整个新滩镇被推入长江,入江物质激起高达54m的涌浪,使新滩镇上、下游停泊于港口的11艘大小船只被摧毁或击沉,夜宿船内的船民死亡10人、失踪2人,伤8人;滑体物质堵塞江停航12天,总计直接经济损失832.42万元。由于对滑坡进行了长期监测,有关部门临滑前做出了及时、准确的预报,使得滑坡区的1371人及时撤离,无一人伤亡。

13



清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 对工厂、矿山的危害

中国汽车生产基地之一的湖北十堰第二汽车制造厂一直处于滑坡、崩塌、泥石流灾害的不断侵袭之中,在厂区18 km²范围内,共有滑坡、崩塌270处,总方量达750×10⁴ m³,严重威胁着厂区的生产和工厂安全。1982年7月底,在突降暴雨的诱发下,多处发生滑坡、崩塌、泥石流,崩滑体物质冲入两个专业厂的7个车间,工厂被迫停产数天。

1990年8月11日,天水锻压机床厂附近发生滑坡,摧毁该厂的6个生产车间,造成6人死亡,工厂被迫停产,直接经济损失达2000万元以上。

几乎所有矿山都不同程度地遭到滑坡、崩塌、泥石流灾害的危害或威胁。这些山地地质灾害在某种程度上已经成为影响矿山建设和矿产开发的“公害”。在露天矿山,滑坡、崩塌灾害几乎影响着矿山生产的整个过程。据中国10个大型露天矿山的统计,不稳定或具有潜在滑坡危险的边坡约占边坡总长度的20%,个别矿山甚至高达33%。

辽宁省抚顺露天矿自1914投产至1985年,共发生滑坡近60次。为整治滑坡,共开挖截割剥离石近1×10⁶ m³。滑坡造成多次重大事故,发生于1959年的滑坡使矿山的主要提升运输系统西大卷停运,后期工程处理历时3年,耗资2000余万元;1964年南帮西部滑坡,使矿山机修厂垮落、毁坏,1979年露天矿西端边坡发生大滑坡,摧毁西大卷提升系统,使矿山再度停产;露天矿西北帮的滑坡及地面变形,严重影响了抚顺石油一厂建筑物的安全。

15

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 对农田的危害

1982年7月18日,重庆市石柱县桥头乡沙岭滑坡,毁耕耕地0.66 km²,使全村农户严重受灾。1983年3月7日,甘肃省东乡族自治县酒勒山发生了我国罕见的高速、远程大型滑坡,滑坡体覆盖范围南北长达1600m,东西宽达1700m,面积约1.4 km²,体积约5000×10⁴ m³。如此大规模的滑坡,全过程仅用了一两分钟,最大滑速19.8 m/s。酒勒山滑坡毁耕耕地1.67 km²,使两座小型水库部分被淤埋、阻塞,破坏灌溉设施4处、公路及高压电线1.3 km长;使酒勒、新庄等三个村庄被摧毁,400余头牲口被埋没,财产损失共约40万元,死亡237人,重伤27人,损失之惨重为国内所罕见。

16

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 对水利水电工程的危害

滑坡对水利水电工程的危害也是极为严重的。特别是对水库而言,它不仅使水库淤积加剧,降低水库综合效益、缩短水库寿命,而且还可能毁坏电站,甚至威胁大坝及其下游的安全。

1963年发生在意大利瓦依昂(Vaiont)大坝南侧的大规模滑坡的滑移给大坝及其下游的居民带来了毁灭性的灾难。瓦依昂大坝于1960年修建在意大利东北部靠近奥地利和斯洛文尼亚的一个深山峡谷里。水库蓄水量为1.5×10⁸ m³。坝址区河谷两侧为高角度易滑的沉积岩出露区,并发育有密集的裂隙和古滑动面;大坝修建后,水库水体使坝脚处的岩石饱和、孔隙水压力上升。1963年8-10月的大暴雨诱发了10月9日晚的大滑坡,瓦依昂水库南侧发生快速的大规模坍塌滑动,滑体长1.8 km、宽1.6 km,体积超过2.4×10⁸ m³,一部分水库被岩石碎屑填充,并高出水面150 m。滑坡冲击地面,在欧洲大部分地区都感觉到了地震。滑动持续时间不足30秒钟,运动速率达30 m/s,滑体前锋形成的巨大气浪掀翻了房屋。大坝北侧的水柱高出水面240 m,高出坝顶100 m高的波浪冲出水库,并以70多米高的水墙沿瓦依昂河谷向下游的Longarone城冲击。大部分伤亡损失是由于库水涌浪造成的,仅6分钟时间,Longarone城就被大水淹没,约3000名居民被洪水淹死。这一事件被看做是世界上最大的水库大坝灾难。

17

清华大学研究生课程——《灾害学》

Vaiont Dam Disaster

18

清华大学研究生课程——《灾害学》

Vaiont Dam Disaster

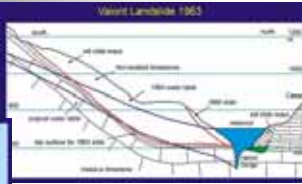



origin of rock slide
slide block
Vaiont River Valley
Italian Alps
Village of Casso & Bivio

19

清华大学研究生课程——《灾害学》

Vaiont Dam Disaster

Vaiont Landslide 1963

20

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 对水利水电工程的危害

我国水库库区也经常发生滑坡灾害。如湖北黄龙滩水库 1976~1988 年共发生滑坡 82 处,总方量达 $1.88 \times 10^6 \text{ m}^3$ 之多,造成水库严重淤积。刘家峡水库自 1968 年蓄水以来,库区不断发生滑坡、崩塌,仅 1970~1984 年入库总方量达 $1.203 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,约占水库淤积物质的 1/3。1980 年 6 月 28 日,甘肃民乐县瓦房城水库滑坡,推倒水库进水塔一侧的岸坡护墙,水库因此不能正常运行。

21

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 滑坡的次生灾害

滑坡灾害不仅直接危害受灾地区,还常常引发一系列次生灾害,如洪水、涌浪、淤积及有毒废石渣污染等,造成更大范围的影响和更严重的损失,次生灾害损失有时远远超过灾害本身的直接损失。

1963 年意大利瓦依昂水库滑坡死亡约 3000 人的特大灾难就是滑坡诱发库水形成的洪水造成的(表 6-5)。1967 年 6 月 8 日,我国四川省雅砻江唐古拉滑坡本身并未造成任何直接损失,但 $6800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 土石滑入江中,形成 355 m 高的涌浪并越过坝顶,猛烈的洪水将下游沿岸 600 km 范围内所有土地、房屋、公路、桥梁等一扫而光,危害极其严重。1963 年 9 月,甘肃舟曲县泥流坡滑坡,堵塞白龙江,使上游水位升高 18.5 m,回水达 6.5 km,淹没上游大片土地、房屋。

22

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的危害

■ 滑坡的次生灾害

表 6-5 全球历史上部分大型岸坡崩塌造成的涌浪及伤亡情况
(据明广福,1986;刘传正,1995,编制)

| 崩塌名称 | 所在地 | 发生年代 | 水体性质 | 崩塌土方量/ m^3 | 涌浪高度/m | 死亡人数 |
|-----------|-----|------|------|--------------------------|--------|---------|
| Changar | 秘 鲁 | 1971 | 湖 泊 | 1×10^6 | 30 | 400~600 |
| Vaiont | 意大利 | 1963 | 水 库 | $(2.5\sim3) \times 10^6$ | 260 | 3000 |
| Liwya Bay | 英 国 | 1958 | 海 湾 | 3×10^6 | 530 | 2 |
| Lion Lake | 挪 威 | 1636 | 湖 泊 | 1×10^6 | 70 | 73 |
| Tafjord | 挪 威 | 1934 | 峡 湾 | 1.5×10^6 | 62 | 44 |
| Lion Lake | 挪 威 | 1905 | 湖 泊 | 4×10^6 | 40 | 61 |
| Shimabara | 日 本 | 1792 | 海 湾 | 5.4×10^6 | 10 | 1500 |
| Laufjord | 挪 威 | 1756 | 峡 湾 | 1.2×10^7 | 40 | 32 |
| 长江新滩 | 中 国 | 1985 | 水 库 | 3×10^7 | 36.5 | 10 |
| 乌江鸭冠岭 | 中 国 | 1994 | 峡 湾 | 3.9×10^6 | 30 | 9 |
| 柘溪塘岩光 | 中 国 | 1961 | 水 库 | | 21 | |

23

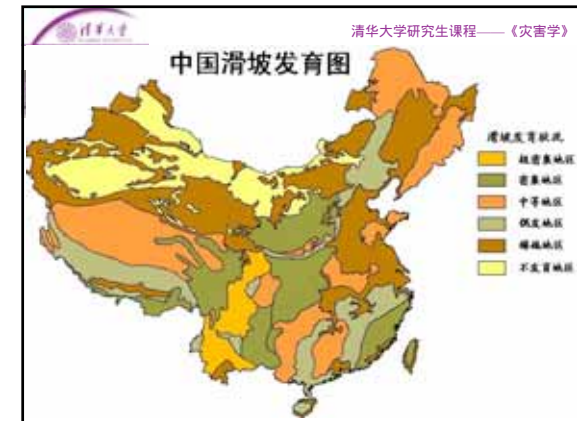
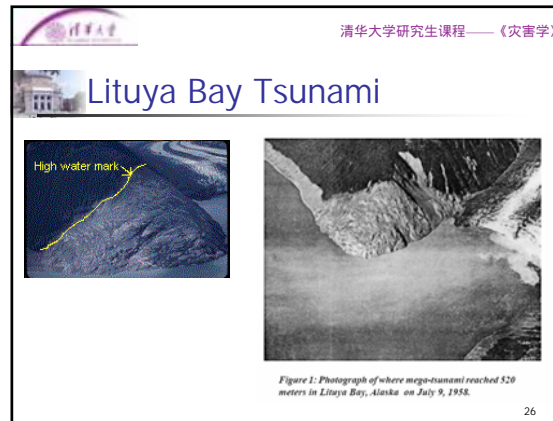
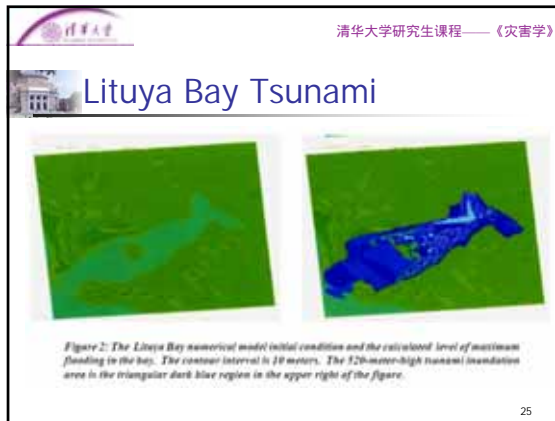
清华大学研究生课程——《灾害学》

Lituya Bay Tsunami

The rockslide occurred along the eastern wall of the Gilbert Inlet. The mass of rock striking the surface of the bay created a giant splash, which sent water surging to a height of 1720 feet across the point opposite the inlet.



24



- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ## 滑坡的形成条件
- 内在因素
 - 岩土类型
 - 结构松软、抗剪强度和抗风化能力较低、在水的作用下其性质易发生变化的岩土
 - 地质构造
 - 节理、裂隙、层理面、岩性界面、断层发育
 - 地形地貌
 - 斜坡、前缘
 - 水文地质条件
 - 软化岩石、产生动水压力、软化滑动面
- 28

- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ## 滑坡的形成条件
- 外在因素
 - 自然原因
 - 地震、降雨降雪、地表水的冲刷、浸泡
 - 人为原因
 - 开挖坡脚
 - 蓄水排水
 - 堆填加载
 - 破坏植被
- 29

- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ## 滑坡的发育阶段
- 蠕变变形阶段
 - 坡顶出现裂缝、两侧出现剪切裂缝、坡脚岩石被挤出
 - 滑动面尚未贯通
 - 从斜坡发生变形、坡面出现裂缝到斜坡滑动面全面贯通的发展阶段称为蠕变变形阶段
 - 持续时间从几年到几天
- 30

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的发育阶段

- 滑动破坏阶段
 - 滑动面贯通后，滑坡开始整体下滑的阶段
 - 滑动速度主要取决于滑动面的形状、抗剪强度、滑坡体的体积以及在斜面上的位置
 - 如果滑带土的抗剪强度变化不大，则滑坡不会急剧下滑，一般每天只滑动几米
 - 如果滑带土的抗剪强度剧烈变化，可能会出现每秒几米到几十米的高速滑动

31

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的发育阶段

- 压密稳定阶段
 - 重力作用下，滑坡体上的松散岩土逐渐压密，地表裂缝被填充，滑动面附近岩石强度由于压密、固结提高
 - 滑坡面变缓，滑坡前缘无渗水，滑坡表面植被重新生长，说明滑坡已经稳定
 - 持续几年甚至更长的时间

32

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的分级

- 按照滑坡体大小

表 18-2 滑坡分级表

| 强度或规模 | 滑坡体积/ ($1 \times 10^4 \text{ m}^3$) | 死亡人数/人 | 直接经济损失/万元 |
|-------|---------------------------------------|----------|-----------|
| 巨型 | > 1000 | > 100 | > 100 |
| 大型 | > 100 - 1000 | 10 - 100 | 10 - 100 |
| 中型 | 10 - 100 | 1 - 9 | < 10 |
| 小型 | < 10 | 0 | 0 |

33

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡常见滑动面的类型

- 均质土滑动面
- 碎石土滑动面
- 基岩滑动面

34

清华大学研究生课程——《灾害学》

典型滑坡的多角度分析

表 18-3 典型滑坡分类一览表

| 分类依据 | 滑坡分类 | 滑坡特征描述 |
|---------|----------|------------------------------|
| 滑体物质组成 | 黄土滑坡 | |
| | 粘性土滑坡 | |
| | 堆填土滑坡 | 人工填筑土 |
| | 堆积土滑坡 | 所有第四系堆积物 |
| | 破碎岩石滑坡 | |
| 滑体厚度 | 浅层滑坡 | 滑体厚度小于 6m(有的规定 3m) |
| | 中层滑坡 | 滑体厚度 6 - 20m(有的规定 3 - 15m) |
| | 厚(深)层滑坡 | 滑体厚度 20 - 50m(有的规定 15 - 30m) |
| | 超厚(深)层滑坡 | 滑体厚度大于 50m(有的规定 30m) |
| 主滑面成因类型 | 堆积面滑坡 | 堆积作用形成的软弱面,内部层面 |
| | 层面滑坡 | 沉积变质岩层面,喷出岩上下层接触面 |

清华大学研究生课程——《灾害学》

| 分类依据 | 滑坡分类 | 滑坡特征描述 |
|---------|--------|---------------------|
| 主滑面成因类型 | 构造面滑坡 | 节理面、断层面、原生构造裂隙面 |
| | 同生面滑坡 | 土质滑坡,不通过软弱面 |
| 地形发育过程 | 幼年期滑坡 | 滑坡后部新鲜岩石,突发性,多成一块 |
| | 青年期滑坡 | 滑坡后部风化岩石,一定间歇性程度 |
| | 壮年期滑坡 | 滑坡后部混砾砂土,间歇性 |
| | 老年期滑坡 | 滑坡后部混巨砾砂土,连续性 |
| 岩体结构类型 | 块状岩体滑坡 | 层状岩体,厚层岩体 |
| | 层状岩体滑坡 | 层状岩体,层状岩体 |
| | 碎裂岩体滑坡 | 碎裂岩体 |
| | 松散岩体滑坡 | 黄土滑坡,粘性土滑坡,碎石土滑坡 |
| 滑动时代分类 | 新滑坡 | 发生于河漫滩时期,具有现代活动性 |
| | 老滑坡 | 发生于河漫滩时期,目前暂时稳定 |
| | 古滑坡 | 发生在河流阶地侵蚀时期或稍后,目前稳定 |
| | 始滑坡 | 发生在当地现今水系形成之前,极稳定 |

36

清华大学研究生课程——《灾害学》

| | | |
|-----------|-----------|------------------------------|
| 滑动历史分类 | 首次滑坡 | 滑速高, 滑体为完整的原始地层 |
| | 再次滑坡 | 滑速低, 滑体为滑坡堆积物 |
| 区域地质条件和岩性 | 表层斜坡移动 | |
| | 泥质岩石滑坡 | |
| | 坚硬岩石滑坡 | |
| | 特殊类型滑坡 | |
| 滑体规模 | 小型滑坡 | 体积小于 3 万 m ³ |
| | 中型滑坡 | 体积 3 - 50 万 m ³ |
| | 大型滑坡 | 体积 50 - 300 万 m ³ |
| | 巨型(超大型)滑坡 | 体积大于 300 万 m ³ |

37

清华大学研究生课程——《灾害学》

土坡的稳定性分析

- 无粘性土简单土坡

38

清华大学研究生课程——《灾害学》

土坡的稳定性分析

- 土坡分析的圆弧法

39

清华大学研究生课程——《灾害学》

土坡的稳定性分析

- 折线滑坡稳定分析

图 18-7 传递系数法计算滑坡推力

40

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩石边坡破坏类型

| 破坏类型 | 示意图 | 特征 |
|-------|-----|----------------------------------------------------------------|
| 平面破坏 | | 一个滑动平面和一个滑动块体 |
| 楔形破坏 | | 主要结构面的走向、倾向与坡面的基本一致, 结构面的倾角小于坡角且大于其摩擦角 |
| 曲线形破坏 | | 一个主要滑动平面和主边、被动两滑动块体 |
| 圆形破坏 | | 两组结构面的交线倾向坡面, 交线的倾角小于坡角且大于其摩擦角 |
| 块状破坏 | | 下部发育的破碎岩体发生旋转破坏, 破坏面呈圆弧形或折线形 |
| 层状破坏 | | 岩体按照结构面分离成一系列岩层, 当为软岩时, 岩层产生顺层弯曲; 当为硬岩时, 岩层可再发生交叉层状层状破坏, 向坡面倾倒 |

41

清华大学研究生课程——《灾害学》

土坡的稳定性分析

- 有限元法

- 建立有限元模型、划分网格
- 设定材料模型(莫尔-库仑或其他材料本构)
- 计算塑性应力区分布
- 调整土体承载力参数直至位移发生转折点
- 得到边坡的安全系数

42

清华大学研究生课程——《灾害学》

边坡稳定分析的参数反演法

- 土工项目大量存在参数无法准确测量的问题
 - 原状土
 - 试验方法
 - 水
- 土工材料在施工过程中会有很多不确定性变化
 - 降雨
 - 时间——流变
 - 冻融

43

清华大学研究生课程——《灾害学》

需要采用参数反演技术

- 参数反演的基本思想
 - 首先根据试验结果或经验给出一组模型参数
 - 计算得到结构（岩土）的反应
 - 分析参数的敏感性
 - 根据实测结构变形对土体参数加以修正
 - 用修正后的参数来模拟模型下一步的行为

44

清华大学研究生课程——《灾害学》

核心问题

- 计算模型
 - 极限平衡法
 - 有限元法
- 反演算法
 - 各种数学规划、数学优化算法

45

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩石边坡的稳定算法

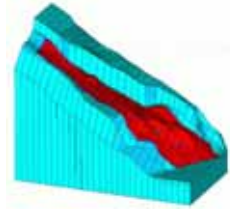
- 工程类比法，应关注
 - 已有滑坡等不良现象
 - 有薄弱层或裂隙
 - 软弱层和坡面倾角一致
 - 地层渗水性差异较大
 - 坡上漏水
 - 存在爆破等施工方法

46

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩石边坡的稳定算法

- 图解法
- 有限元法
 - 需要引入裂隙、节理单元
 - 需要考虑岩石之间的接触非线性

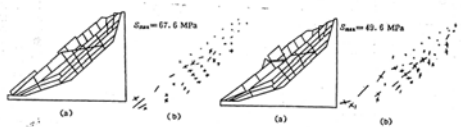


47

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩石边坡的稳定算法

- 刚体 - 弹簧元法
- 离散单元法



48

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩石边坡的稳定算法

- DDA方法

(a) Step=0, $r=0.0$ (b) Step=50, $r=0.50s$
(c) Step=100, $r=0.84s$ (d) Step=230, $r=1.53s$

49

清华大学研究生课程——《灾害学》

用有限元强度折减法进行边坡稳定分析

- 有限元强度折减系数法的基本原理
- 有限元强度折减系数法精度分析
- 均质土坡稳定分析
- 岩质边坡稳定分析

郑颖人院士报告

50

清华大学研究生课程——《灾害学》

用有限元强度折减法进行边坡稳定分析

- 边坡稳定分析是经典土力学最早试图解决而至今仍未圆满解决的课题，各种稳定分析方法在国内外水平大致相当。
- 对于均质土坡，传统方法主要有：极限平衡法，极限分析法，滑移线场法等，就目前工程应用而言，主要还是极限平衡法，但需要事先知道滑动面位置和形状。

51

清华大学研究生课程——《灾害学》

用有限元强度折减法进行边坡稳定分析

- 对于均质土坡，可以通过各种优化方法来搜索危险滑动面，但是对于岩质边坡，由于实际岩体中含有大量不同构造、产状和特性的不连续结构面（比如层面、节理、裂隙、软弱夹层、岩脉和断层破碎带等），这就给岩质边坡的稳定分析带来了巨大的困难，传统极限平衡方法尚不能搜索出危险滑动面以及相应的稳定安全系数。

52

清华大学研究生课程——《灾害学》

用有限元强度折减法进行边坡稳定分析

- 随着计算机技术的发展，尤其是岩土材料的非线性弹塑性有限元计算技术的发展，有限元强度折减法近来在国内外受到关注，对于均质土坡已经得到了较好的结论，但尚未在工程中实用

53

清华大学研究生课程——《灾害学》

用有限元强度折减法进行边坡稳定分析

- 本文采用有限元强度折减法，对均质土坡进行了系统分析，证实了其实用于工程的可行性，对节理岩质边坡得到了坡体的危险滑动面和相应的稳定安全系数。
- 该方法可以对贯通和非贯通的节理岩质边坡进行稳定分析，同时可以考虑地下水、施工过程对边坡稳定性的影响，可以考虑各种支挡结构与岩土材料的共同作用，为节理岩质边坡稳定分析开辟了新的途径。

54

清华大学研究生课程——《灾害学》

有限元强度折减系数法的基本原理

$$c' = \frac{1}{F_{trial}} c$$

$$\phi' = \arctan\left(\frac{1}{F_{trial}} \tan \phi\right)$$

- 用折减系数法求解实际边坡稳定问题时，通常将土体假设成理想弹塑性体，其中屈服准则常选用摩尔-库仑准则（M-C）、D-P准则以及摩尔-库仑等面积圆准则。

55

清华大学研究生课程——《灾害学》

不同准则换算表

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k$$

| 编号 | 准则种类 | α_ϕ | k |
|-----|------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| DP1 | 外角点外接 D-P圆 | $\frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$ | $\frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$ |
| DP2 | 内角点外接 D-P圆 | $\frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}$ | $\frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}$ |
| DP3 | 内切D-P圆 | $\frac{\sin \phi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \phi}}$ | $\frac{3c \cos \phi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \phi}}$ |
| DP4 | 等面积D-P圆 | $\frac{2\sqrt{3} \sin \phi}{\sqrt{3}\sqrt{9 - \sin^2 \phi}}$ | $\frac{6\sqrt{3}c \cos \phi}{\sqrt{3}\sqrt{9 - \sin^2 \phi}}$ |

56

清华大学研究生课程——《灾害学》

不同换算方法比较

- 摩尔库仑等面积圆准（M-C EAC）则与简化Bishop法所得稳定安全系数最为接近

57

清华大学研究生课程——《灾害学》

不同流动法则的影响

- 有限元计算中，采用关联还是非关联流动法则，取决于值（剪胀角）： $\nu = 0$ ，为关联流动法则， $\nu > 0$ ，为非关联流动法则。

| $\phi = 45^\circ, C = 40\text{KPa}, H = 20\text{m}, \text{DP4准则}$ | | | |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 材料参数 | $\nu = 10^\circ$ | $\nu = 17^\circ$ | $\nu = 25^\circ$ |
| 非关联 | 0.871 | 1.105 | 1.363 |
| 关联 | 0.887 | 1.137 | 1.425 |
| 相对误差 | 0.018 | 0.029 | 0.045 |

58

清华大学研究生课程——《灾害学》

有限元法引入的误差

- 网格的密度影响

59

清华大学研究生课程——《灾害学》

网格疏密对计算结果的影响

| $H = 20\text{m}, \phi = 45^\circ, \nu = 17^\circ, c = 10000\text{Pa}$ | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 节点数 | 577 | 1111 | 2250 |
| DP4 | 0.661 | 0.618 | 0.593 |
| 简化Bishop法 | 0.583 | 0.583 | 0.583 |
| (DP4-Bishop)/Bishop | 0.134 | 0.060 | 0.017 |

60

清华大学研究生课程——《灾害学》

模型边界范围

| 相对边距比 | 0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L/H | 1.129 | 1.124 | 1.124 | 1.120 | 1.122 | 1.121 | 1.129 |
| R/H | 1.097 | 1.078 | 1.121 | 1.122 | 1.122 | 1.120 | 1.123 |
| B/H | 1.106 | 1.117 | 1.120 | 1.131 | 1.124 | 1.132 | 1.131 |

L—坡脚到左端边界的距离（左边距），R—坡顶到右端边界的距离（右边距），B—坡脚到底端边界的距离（底边距），H—坡高

61

清华大学研究生课程——《灾害学》

均质土坡稳定分析

◆ 均质土坡，坡高 $H = 20m$ ，土容重 $\gamma = 25kN/m^3$ ，粘聚力 $c = 42kPa$ ，内摩擦角 $\phi = 17^\circ$ ，求坡角 $\beta = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 时边坡的稳定安全系数。

62

清华大学研究生课程——《灾害学》

计算结果

| 坡角(度) β | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 有限元法（外接圆屈服准则） | 1.78 | 1.62 | 1.48 | 1.36 | 1.29 |
| 有限元法（莫尔-库仑等面积圆屈服准则） | 1.47 | 1.34 | 1.22 | 1.12 | 1.06 |
| 简化Bishop法 | 1.394 | 1.259 | 1.153 | 1.062 | 0.99 |
| Spencer法 | 1.463 | 1.318 | 1.212 | 1.115 | 1.04 |

63

清华大学研究生课程——《灾害学》

- 从表中计算结果可以看出，采用外接圆屈服准则计算的安全系数比传统的方法大许多，而采用莫尔-库仑等面积圆屈服准则计算的结果与传统极限平衡方法（Spencer法）计算的结果十分接近，说明采用莫尔-库仑等面积圆屈服准则来代替莫尔-库仑不等角六边形屈服准则是可行的。
- 通过4组计算方案（改变内摩擦角、内聚力、坡角、坡高H的值）共计106个算例的比较分析表明，用莫尔-库仑等面积圆屈服准则求得的安全系数与Bishop法的误差为4%-8%，与Spencer法的误差为0.5%-4%，说明了有限元强度折减法完全可以实用于土工工程

64

清华大学研究生课程——《灾害学》

岩质边坡稳定分析

- 岩体中的结构面，根据结构面的贯通情况，可以将结构面分为贯通性、半贯通性、非贯通性三种类型。根据结构面的胶结和充填情况，可以将结构面分为硬性结构面（无充填结构面）和软弱结构面。
- 由于岩体结构的复杂性，要十分准确地反映岩体结构的特征并使之模型化是不可能的，也没有必要使问题复杂化，基于这种考虑，对于一个实际工程来说，往往根据现场地质资料，根据结构面的长度、密度、贯通率，展布方向等着重考虑2-3组对边坡稳定起主要控制作用的节理组或其它主要结构面。

65

清华大学研究生课程——《灾害学》

有限元模型及其安全系数的求解

(1) 软弱结构面

岩体是弱面体，起控制作用的是结构面强度，对于软弱结构面，可采用低强度实体单元模拟，按照连续介质处理，材料本构关系采用理想弹塑性模型，屈服准则为广义米赛斯准则。

$$F = \frac{\alpha}{\omega} I_1 + \sqrt{J_2} = \frac{k}{\omega}$$

66

清华大学研究生课程——《灾害学》

有限元模型及其安全系数的求解

(2) 硬性结构面。
无充填的硬性结构面，不能按照传统连续介质原理进行处理

67

清华大学研究生课程——《灾害学》

- 接触面的接触摩擦行为服从库仑定律

$$\tau = c + \sigma \times \text{tg} \varphi$$

$$\sigma \geq 0$$
- 安全系数

$$F_s = \frac{c}{c'} = \frac{\text{tg}(\varphi)}{\text{tg}(\varphi')}$$

68

清华大学研究生课程——《灾害学》

折线型滑动面边坡稳定分析算

69

清华大学研究生课程——《灾害学》

不同方法求得的稳定安全系数

| | 有限元强度折减法 | Spencer法 |
|--------------------------------|----------|----------|
| C=160kPa, $\varphi = 0^\circ$ | 1.00 | 0.99 |
| C=160kPa, $\varphi = 30^\circ$ | 2.11 | 2.11 |
| C=320kPa, $\varphi = 10^\circ$ | 2.33 | 2.33 |
| C=160kPa, $\varphi = 45^\circ$ | 2.09 | 1.98 |
| C=0, $\varphi = 45^\circ$ | 3.08 | 2.94 |

70

清华大学研究生课程——《灾害学》

具有一组平行节理面的岩质边坡算例

| 计算方法 | 安全系数 |
|-----------------|------|
| 有限元法（外接圆屈服准则） | 1.26 |
| 有限元法（等面积圆屈服准则） | 1.03 |
| 极限平衡方法（解析解） | 1.06 |
| 极限平衡方法（Spencer） | 1.06 |

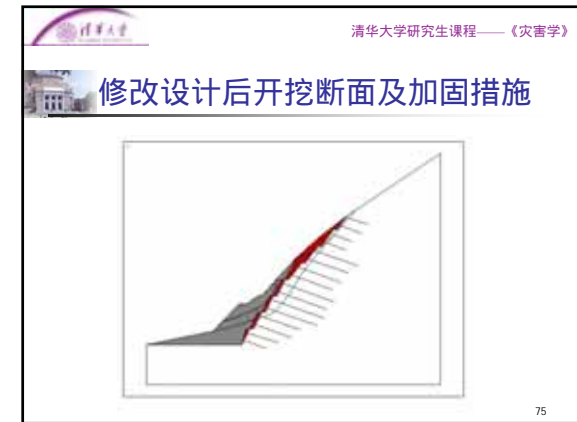
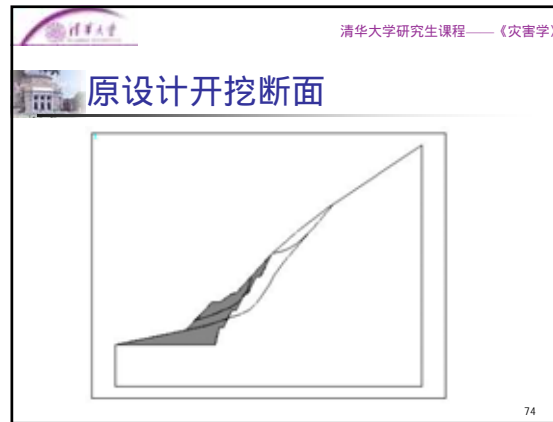
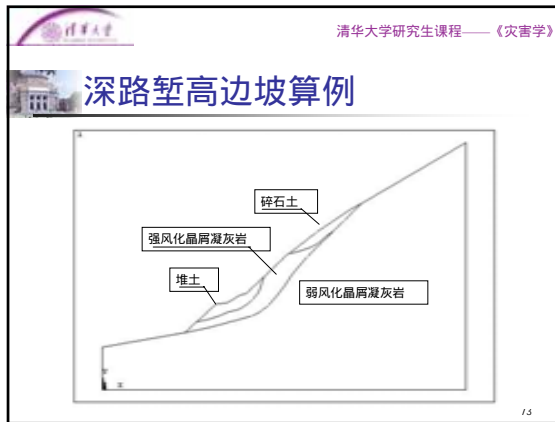
71

清华大学研究生课程——《灾害学》

具有两组平行节理面的岩质边坡算例

| 计算方法 | 安全系数 |
|-----------------|------|
| 有限元法（外接圆屈服准则） | 1.62 |
| 有限元法（等面积圆屈服准则） | 1.33 |
| 极限平衡方法（Spencer） | 1.36 |

72

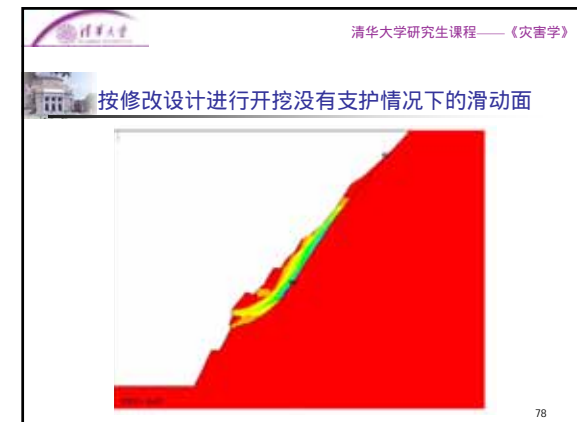
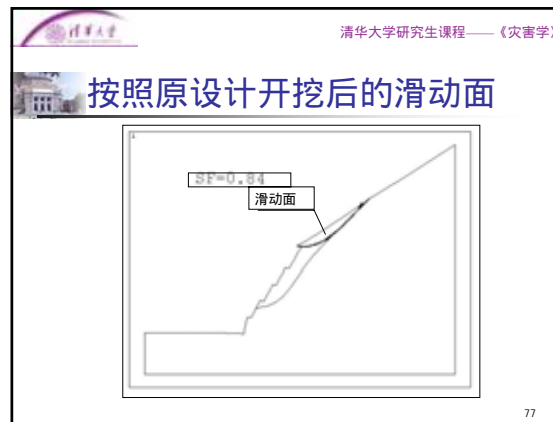


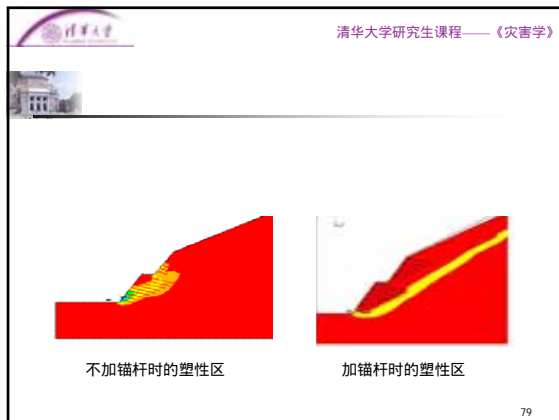
清华大学研究生课程——《灾害学》

不同工况下的稳定安全系数

| | 稳定安全系数 |
|----------------|--------|
| 未开挖前 | 1.31 |
| 按照原设计开挖 | 0.92 |
| 按照修改设计开挖（未加锚索） | 1.06 |
| 按照修改设计开挖（加锚索） | 2.45 |

76





- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ### 有限元法较传统的方法有如下优点
- 能够对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算；
 - 考虑了土体的非线性弹塑性本构关系，以及变形对应力的影响；
 - 能够模拟土坡的失稳过程及其滑移面形状。由图可见滑移面大致在水平位移突变的地方，也是在塑性区塑性发展最充分的地方，呈条带状；
- 80

- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ### 有限元法较传统的方法有如下优点
- 能够模拟土体与支护的共同作用，为无锚杆（锚杆单元被杀死）时边坡稳定安全系数为1.1，有锚杆支护时安全系数为1.5，且塑性区后移。
 - 求解安全系数时，可以不需要假定滑移面的形状，也无需进行条分。
- 81

- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ### 滑坡的防治措施
- 选址尽量避开易滑坡的区域
 - 在难以避免的情况下
 - 直接整治滑坡，避免滑坡发生
 - 采取工程技术措施，避免滑坡是造成严重危害
- 82

- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ### 滑坡整治原则
- 以防为主，尽量避免
 - 尽量避开滑坡，尽量减少诱发滑坡的不利因素
 - 区别情况，综合整治
 - 深入研究滑坡发生的原因和周边条件
 - 彻底根治，以绝后患
 - 避免重复出现，长远规划，连续整治
- 83

- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ### 滑坡整治的途径
- 终止或减轻诱发滑坡的外部条件
 - 截流排水，卸荷减载，坡面防护
 - 改善边坡内部力学特性和物质结构
 - 土质改善，注水泥浆
 - 设置抗滑工程直接阻止滑坡的发展
 - 抗滑桩，挡土墙，预应力锚固
- 84

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防治措施

- 截流排水
 - 滑坡体外的水避免进入滑坡体，滑坡体内的水要尽量排出
 - 外围截水沟，在滑坡体周边外侧开挖引水沟避免地表水进入滑坡体
 - 内部排水沟，在滑坡体内部开挖排水沟使水能够尽快流出滑坡体
 - 坡面夯实防渗，让地表水能够尽快流走，避免渗入滑坡体
 - 排水孔和盲沟

85

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防护措施

- 削坡减荷
 - 降低滑坡体的下滑力
 - 减小滑坡体坡度
 - 削去滑坡体后缘的土方
 - 增加滑坡体前缘的重量

86

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防护措施

- 边坡防护
 - 岩石边坡防护
 - 抹面、喷浆、喷混凝土、片石护墙、锚杆喷浆护坡、挂网喷浆护坡
 - 避免边坡滑落和冲刷

87

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防护措施

- 边坡防护
 - 土质边坡防护
 - 种草，降低水对边坡的冲刷，提高边坡土体的抗剪强度
 - 砌片石框架或锚杆护坡
 - 土工织物

88

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防护措施

- 江河湖海和水库边坡
 - 边坡经常受到冲刷，以及水位变化的影响，非常容易发生滑坡
 - 凹岸必防
 - 当冲必防
 - 软岸必防
 - 凡有局部冲刷的地方

89

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防护措施

- 抗滑工程
 - 支撑滑坡体，阻止滑坡体在重力下发生滑动
 - 挡土墙，借助自身重量来阻挡滑坡，适用于小型滑坡
 - 抗滑桩，穿过滑坡面使得滑坡体和滑坡面以下稳定土体形成整体，可以用于固定巨型滑坡
 - 锚杆，提高滑坡面的正应力，进而提高其抗剪强度
 - 支撑，防止陡峭山坡的破坏和滑动

90

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防护措施

- 土质改良
 - 增加土体强度，防止土体破坏
 - 添加材料改变岩土成分
 - 其他改变方法
 - 直接拌合（沥青，水泥，石灰等）
 - 灌浆法

91

清华大学研究生课程——《灾害学》

具体工程防护措施

- 防御避让
 - 避开滑坡，施工防护结构
 - 明硐和御塌棚
 - 内移做隧和外移做桥

92

清华大学研究生课程——《灾害学》

挡, 排, 削, 护, 绕

93

清华大学研究生课程——《灾害学》

治理边坡照片

94

清华大学研究生课程——《灾害学》

治理边坡照片

95

清华大学研究生课程——《灾害学》

治理边坡照片

96

清华大学研究生课程——《灾害学》

治理边坡照片



97

清华大学研究生课程——《灾害学》

滑坡的监测与预报

- 滑坡的动态监测
 - 滑坡位移观测
 - 监测坡体的水平位移和累积位移，掌握滑坡体变形情况
 - 滑坡水文观测
 - 监测滑坡体地下水位是否有明显变化

98

清华大学研究生课程——《灾害学》

重要的异常现象

- 地下水位异常活动
- 坡体出现裂缝
- 岩石开裂和挤压声响
- 滑坡体周围土体出现坍塌和松弛
- 位移明显加速
- 滑坡后缘裂缝急剧张开

99