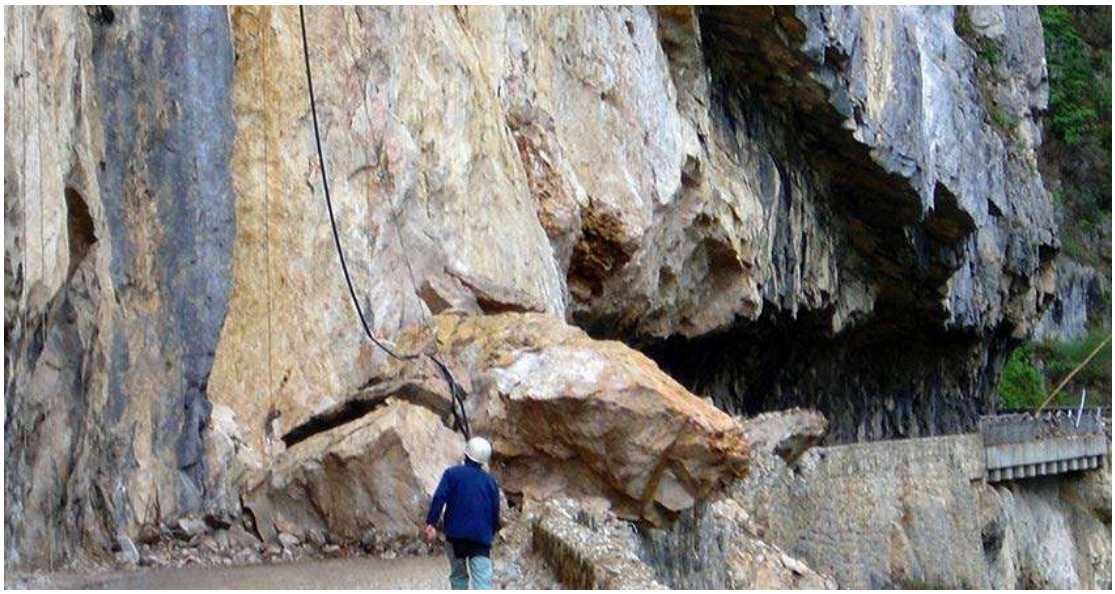
岩体滑坡和崩塌，命中注定的吗？

作者：

法布雷·丹尼斯（FABRE Denis），法国国立工艺学院（CNAM）建筑与能源专业（ICENER）荣誉教授。

汉茨·迪迪埃（HANTZ Didier），讲师，格勒诺布尔阿尔卑斯大学（ISTERRE）。



由于其频发性和有时非常巨大的体积，如滑坡等岩石崩塌现象是主要的自然灾害之一，在年轻的山脉（喜马拉雅山脉、安第斯山脉、阿尔卑斯山脉等）区尤为突出，它们造成的地面破裂发生在几乎所有岩体中都存在的结构软弱面上。这些结构面源于成岩过程（沉积岩的层理面、岩浆岩的冷缩裂隙等），或构造运动（构造历史中因板块运动形成的不同大小的裂缝和断层）。岩体失稳可能仅局限在表层，波及有限的体积，如在所有地形起伏地区都非常频繁发生的石块和碎屑的崩落。然而，在特定的岩体的非连续面与边坡走向关系下，也会发生较大的岩层滑动或翻转，其最终形成的大型滑坡体可达数千万立方米。不幸的是，地震后这种大型的岩体断裂时有发生（如 Huascaran 1970, Nepal 2014）。尽管可以采取如支挡、锚固、各类防护网等一些岩体防护措施，但是将它们应用到城市、村庄、山路或岩石海岸附近的悬崖等所有被确定为有风险的地点，在经济上仍然难以承受。

通常根据发生机制对边坡移动进行分类，如滑动、倾倒、坠落、流动（图 1），

移动体的体积从立方分米到几百立方百米（一立方百米相当于一个 100 米的山脊立方体，或一百万立方米）。

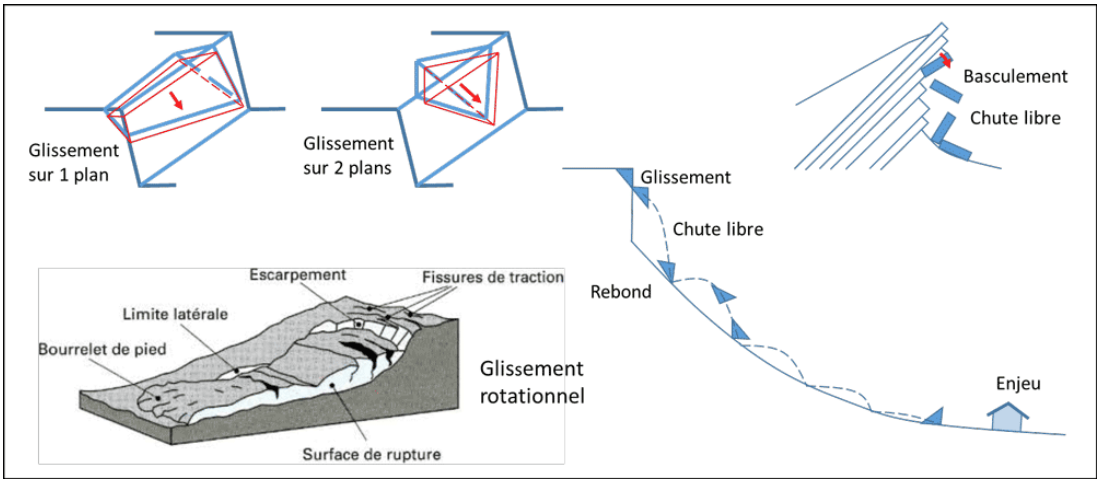


图 1. 滑坡的类型。

（glissement sur 1 plan 在一个平面上滑移，glissement sur 2 plan 在两个平面上滑移，glissement 滑移， chute libre 自由落体， rebond 回弹， Enjeu 利害关系者， Basculement 倾斜，glissement rotationnel 旋转滑移， Escarpement 滑坡壁， Fissures de traction 拉伸裂纹， Limite latérale 滑坡周界， Bourrelet de pied 滑坡舌， Surface de rupture 破裂面）

它们的移动速度差异巨大，从每年几毫米到超过 100 公里/小时（接近在空气中自由落体的速度）。本文简述了岩质滑坡（请参阅《滑坡》）。

1. 岩质滑坡

滑坡是指大块的土壤或岩石在特定断裂面上的移动。根据断裂面的形状可以区分不同类型的滑移。

平推式滑坡通常发生在岩体中已存在的一个或两个非连续面（称为楔形面）上。法国 Claps de luco-en-diois 滑坡事件就是一个著名的例子：在 1442 年，由于 Drôme 河侵蚀了边坡底部，厚厚的石灰岩层在层理面上发生滑动（图 2）。滑坡的体积超过 1 hm^3。但在过去的两千年里，阿尔卑斯山地区最大的滑坡是 1248 年 11 月影响格拉尼尔山（Mont Granier）北部泥灰岩边坡的那次滑坡。近 500 hm^3 泥灰岩在层状节理上向东滑动，摧毁了几个村庄，造成 1000 多人死亡（图 3）。

图 2. Luc's Claps 的滑坡。 [照片由 Didier Mazet-Brachet 提供]

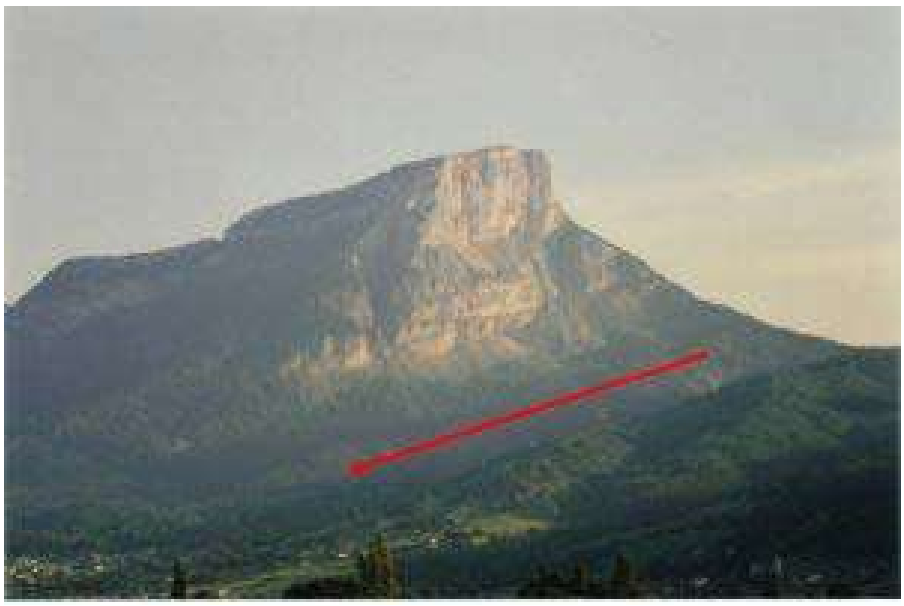


图 3. Granier 滑坡。 [照片由 D. Hantz 提供]

旋转型滑坡发生在轴对称表面上；它们有时被称为圆弧型滑坡，因为在垂直截面上，滑动面是一个圆弧。这类滑坡既可以发生在连续性地块（如土壤）中，也可以发生在不允许平推式滑坡的非连续面上。从 La Clapière 到 Saint-Etienne-de-Tinée 的滑坡就属于旋转型滑坡，滑坡体约为 50 hm^3（图 4）。

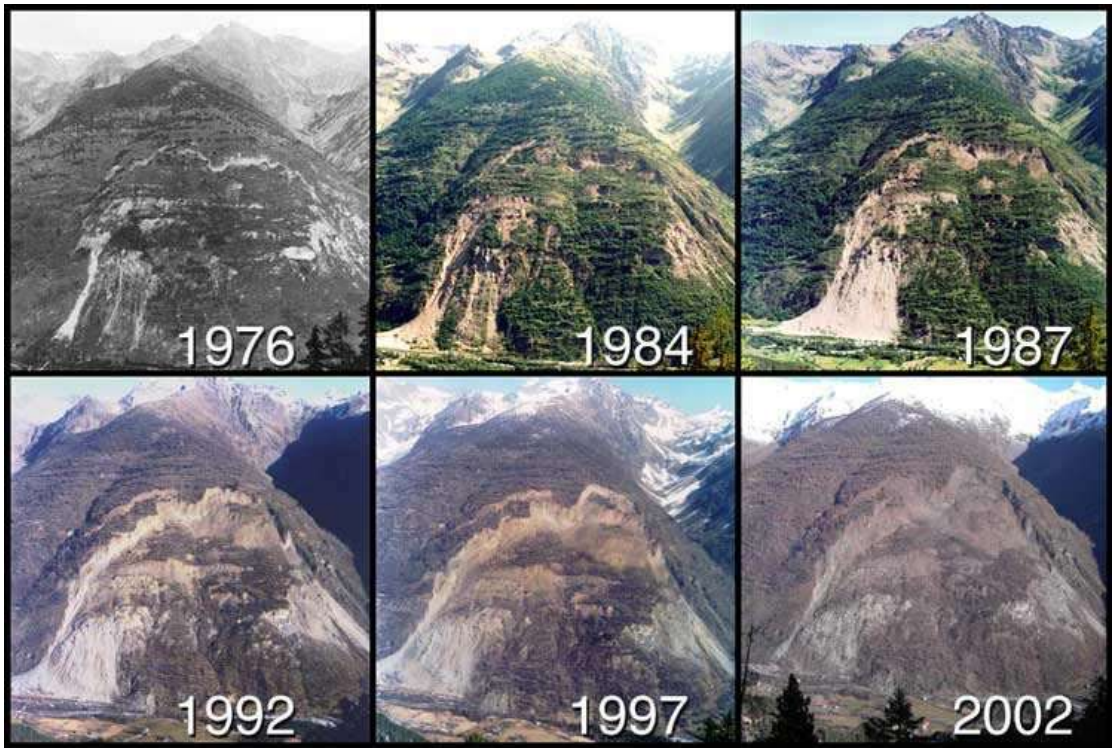


图 4. Clapier 滑坡。

[图片来源：© Lithothèque/PACA. http://www.lithotheque.ac-aix-marseille.fr/]

其他类型的滑坡称为**复合**（或分裂）**型滑坡**，因为它们涉及到岩体的内部形变或滑动体的分裂。

一些山体滑坡可由人类引发。最著名的例子是托克山（Mont Toc，意大利）滑坡。在瓦依昂（Vajont）水库大坝落成蓄水后，270 hm^3 的岩石滑进水库，导致大量的水溢出大坝，50 m 高的水墙摧毁了隆加罗市（Longarone，导致 2000 人遇难）。2001 年上映的电影《人类的疯狂》（La folie des hommes）讲述了这场灾难。这次滑坡是 20 世纪在阿尔卑斯山发生的最大规模的高速滑坡。

2. 倾倒

倾倒是滑坡体以位于其重心下方的旋转轴翻转的过程，已存在裂隙的岩块可能发生翻倒，这与岩层或岩壁的弯曲不同。法国 Séchilienne 的 Sec 山（Mont Sec）的滑坡（图 5）是近乎垂直的河岸翻倒的一个例子，形变层厚度超过了 100 m，导致形成了新的裂缝，这些裂缝的状态一直受到监测。

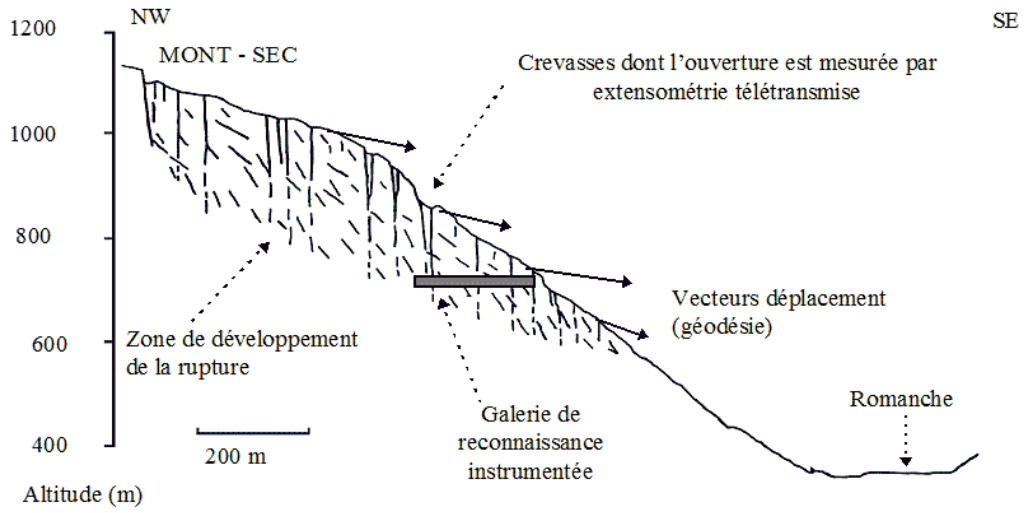


图 5. Séchilienne 边坡运动示意图。

[Source: Pierre Antoine, André Giraud, Jean-Marc Vengeon, 1999. http://www.risknat.org/projets/cper/projets1994-1999/04-Vengeon_&_al_2000-Sechilienne.pdf]（Altitude 海拔，MONT-SEC SEC 山, NW 西北方向，SE 东南方向，Crevasses dont l'ouverture est mesurée parextensométrie télétransmnise 用远程应变计测量裂缝宽度，Vecteurs déplacement （géodésie） 位移矢量（大地测量学），Zone de développement de la rupture 断裂发展区，Galerie de reconnaissance instrumentée 仪器监测廊道，Romanche 罗曼什河）

3. 岩崩

岩崩是指**岩石在边坡上飞溅、弹跳或滚动的快速运动**，在山区非常常见，也会发生在有悬崖和岩石峭壁的沿海地区。在岩崩发生之前，岩体通常发生过滑坡或倾倒。如果仅仅是碎石崩落，那么落石之间几乎没有相互作用。而在大规模的岩质滑坡和岩崩中，石块如同颗粒一样流动，块体之间的相互作用变得至关重要，这些块体的大小从几 dm^3 到几百 m^3 不等，滑坡体总体积可达数十 hm^3。阿尔卑斯山区在 20 世纪发生了两次这种规模的山体滑坡，一次是意大利伦巴第的瓦尔波拉（Val Pola）山体滑坡，另一次是瑞士瓦莱州的兰达（Randa）山体滑坡。

4. 如何预测边坡的行为？

需要专业的工程师来研究不同情况下的边坡运动：（a）对当前稳定边坡的**诊断**（其稳定性能保持多久?）；（b）对现有边坡清除（或切割）或加固工程的**设计**（采用多大的坡角，须安置多少锚杆?）；（c）对缓慢移动的不稳定边坡的**监测**（是否有演变为快速移动的风险？如果是，何时发生?）。在这些活动中采用的研究方法因背景条件和目的而异。

4.1. 稳定边坡的诊断

在土地利用规划过程中，边坡在百年的人类活动时间尺度（human time scale）上的稳定性是一个重要的问题。为了确定在给定的时间内是否有可能发生危害，必须**知道当前的稳定状态**（“过”稳定）和可能导致失稳的过程。岩质边坡的稳定性主要取决于通常不为人知的内部结构（岩石不连续面的分布），岩石的强度及其不连续性。可能降低岩体稳定性并导致其破裂的主要因素包括：**水的存在、冰的作用、地震和其他振动、坡脚被侵蚀或挖掘、过载**。如果这些因素是自然产生的，就无法确定地预测它们会如何演变。此外，我们对这些因子的确切作用过程往往并不了解，因而很难进行模拟。基于此，对稳定边坡的未来行为只能用发生概率来表述预测结果，专家采用“危险度”一词来描述岩体的潜在不稳定性。

我们不能定量地确定一个特定岩体破裂的概率（局地性风险），但是可以根据历史数据库或地貌测量（如使用激光扫描仪），对边坡或匀质地区的边坡位移（弥散性风险），估计出单位面积的断裂数量以及断裂发生的时间（频率）。例如，对格勒诺布尔（Grenoble）附近圣埃纳尔山（Mont Saint-Eynard）悬崖激光扫描仪连续测量结果表明，每年每公顷（hm^2：边长为 100 米的正方形）面积上坠落的岩石体积超过 1 m^3。

4.2. 边坡清理或加固的设计

这方面考虑的问题不再是何时会发生失稳，而是如何确保不发生失稳。因此，通常采用悲观模型（换言之，预防性原则）来分析所关注的边坡的稳定性：最常见的情况是，由于信息缺乏，我们假设断裂面是无限延伸的；模型参数的取值不是最可能的值，而是发生的可能性更低的值。另外，目标通常是达到过稳定状态。如果达不到，则需要对工程进行相应的修改，例如减小坡角等。

评估岩体稳定程度的最快捷方法是将位移描述为岩体在单个平面上的滑动：**比较引起滑动的力**（滑动力）**和对抗滑动的最大力**（抗滑力），抗滑力与滑动力的比值即为边坡稳定性安全系数（safety factor）。只有当安全系数大于 1 才能认为边坡是稳定的。滑动力的计算不仅考虑岩体的质量，也考虑地震或者水渗入边坡等临时事件可能产生的应力。

称为离散元法的更复杂的数值方法也可用于计算由开挖引起的岩体位移，进而分析滑坡的复杂机理，确定位移量是否可以接受。与上述基于静态分析的方法

不同，离散元法基于动力学原理或牛顿第二定律。

4.3. 慢速位移的不稳定边坡的监测

当发现边坡位移并形成风险时，必须对其进行监测，通常包括测量边坡或岩体中的标志物（如钻孔或坑道）的位移。受雨水或融雪后渗入边坡的水和地震等的影响，位移速度很少是恒定的。经验表明，在没有这些外部因素的情况下，如果位移速度增加，那么这种加速的趋势就可能一直持续，直到边坡坍塌，滑坡体完全脱离其起始区域，高速冲向下方。图 4 给出了一个监测边坡的例子（见上文）。

5. 岩石的运移距离能有多远？

可以用多种力学方法估计滑坡造成的岩石运动距离。第一个是基于能量角的方法，用于量化滑坡体位移过程中的能量损失（图 6）。当滑坡体位移停止时，其势能较位移前更低；在一个边坡剖面中，从位移起始区域画一条线（能量线），其倾角等于能量角，就可以判定滑坡体的停止点。在三维空间中，停止点位于地形曲面与顶点为起始区域圆锥体的交点。对于几百 hm^3 的滑坡体，能量角可以小于 10°。格兰尼尔（Granier）滑坡就是一个这样的例子，滑坡体移动距离达 8 公里多。岩体崩塌的能量角一般约为 40°，但位移量最大的岩崩，其能量角低于 30°。

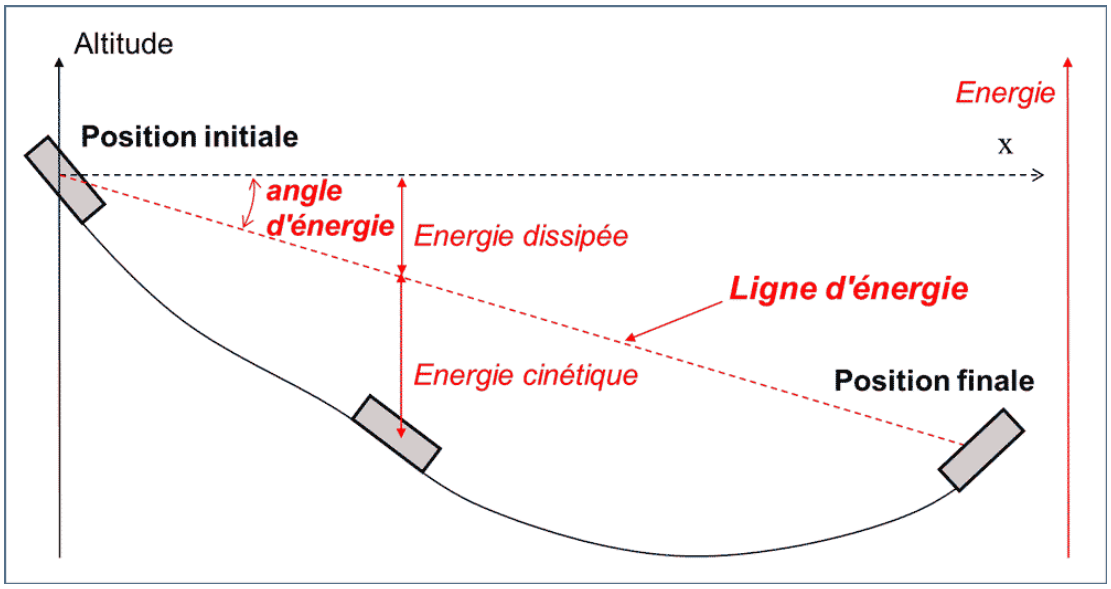


图 6. 能量线法。

（Altitude 海拔，Energie 能量，Position initiale 初始位置, Position finale 最终位置，angle d'énergie 能量角，Energie dissipée 能量耗散，Ligne d'énergie 能量线，Energie cinétique 动力学能量）

能量的耗散方式有：发生不完全弹性形变的岩石的回弹、岩体的碎裂、发出震动波、损毁树木等。

对于落石而言，可采用合适的软件计算石块在边坡上坠落、弹跳或滚动的轨迹。虽然坠落轨迹的计算不是问题，但弹跳模型比较难以建立，可以引入能量恢复系数（energy restitution coefficients）来完成，它表示岩块在边坡弹跳或与另一个块体碰撞后初始能量留存的比例。此外，观察停留在边坡上的落石，可以为预测落石发生的范围和频率提供有价值的信息。当然，观察的结果可能存在偏差，因为最近几个世纪里这些落石可能因自然或人类使用而移动过位置。

图 7 展示了使用 Rockyfor3D 软件对发生在 Grenoble 附近的 Saint-Eynard 山体滑坡的模拟结果。

当块体数量多，块体之间相互作用强（岩崩与碎屑流）时，可以将其视为流体，使用散体力学定律进行建模。这种方法也被用来模拟长距离、流体形式移动的滑坡（滑坡导致的泥石流）。

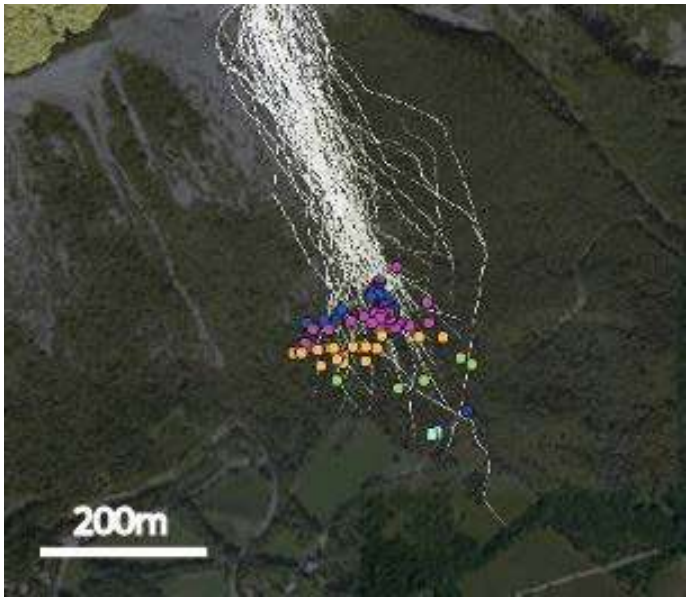


图 7. 落石模拟的例子：图中白色的痕迹代表模拟的落石路径；彩色的点代表在边坡上观察到的掉落的岩石。（模拟软件：Rockyfor3D）

6. 防护，或如何保护自己免受岩体失稳伤害

对于自然灾害而言，有两类防护措施。主动防护旨在消除危害本身，被动防护的目的不是消除自然现象，而是降低其对建筑物、通讯等的不利影响。

主动防护方法多种多样，包括：

- 通用的方法，如地表或地下**排水**，以及利用**护坡植被**限制由径流导致的侵蚀（沟蚀）和导致的机械性能（摩擦力，岩石节理的黏聚力）改变的渗透；

- **支护**，如挡土墙、锚杆或用喷射混凝土覆盖的锚网；

- **防护网（悬挂或沿壁锚定）**，即设计用来滞留块体和防止坠落的石块飞溅的金属网结构；

- **清理与挖除**：这些是消除不稳定因素的激进解决方法。但是并非总能获得预期的良好效果，例如持续形变以及爆破导致的振动往往会损害被清除部分周围地块的稳定性。

被动防护方法也非常多样：

图 8. 防护障。[图片来源：Gavet, Sage 摄影]

- **防护障**（图 8）和拦石墙是设置在不稳定边坡底部的石笼或混凝土结构，目的是在岩石到达防护对象之前阻止其运动。建设这些设施的时候，需要选择有足够空间的地方，同时根据它们的建筑材料设计相应的尺寸。当然，建设之前首先需要对落石的运动（落石轨迹研究）进行数值模拟；

- **导流堤**也是一种修筑在边坡上堤坝，起到将落石引导到没有防护对象（如房屋等）的地方；

- **棚硐**，类似于应对雪崩的隧道，可以保护位于落石区的交通路线；

- 在陡峭的边坡上设置**刚性防护装置**，尽量靠近岩石松动的区域。这些设施的的安装往往很困难。

- 柔性**防护网**可以设置在落石区的边坡下部靠近防护对象的地方。最著名的柔性网类似“反潜网”（在第二次世界大战期间用于防止潜艇进入港口），用钩环将防护网固定在一些刚性的柱子上，需要根据预研确定的随机落石的位置分布及落石的冲击能量来设计安装。

图 9. Ripailler 地区的柔性防护网。[图片来源：IRSTEA]

采取积极的措施可有效降低岩石失稳的风险，但是通常需要大量的资金投入，因此，不可能将所有存在的风险点都清除掉。最好的防护措施总是先通过地质勘察评估风险，采取有效的预防措施（如排水和定期清除不稳定岩石），并且在发现岩石出现位移时持续监测，为必要时采取道路封闭或居民疏散等措施提供预警。

译者：张泽晋　　编审：崔骁勇　　责任编辑：胡玉娇

附加信息

张泽晋：中国科学院大学，中丹学院，硕士研究生

崔骁勇：中国科学院大学，生命科学学院，教授