

锡金甘托克喜马拉雅山区滑坡灾害及其缓解措施

Rajinder Bhasin¹ Eystein Grimstad¹ Jan Otto Larsen¹

Ashok K.Dhawan² Rajbal Singh S.K.Verma² K.Venkatachalam² 著

葛秀珍³ 译 朱汝烈³ 校

(¹Norwegian Geotechnical Institute,P.O.Box 3930-Ullevaal Hageby,N-0806,
Oslo,Norway; ²Central Soil and Materials Research Station,New Delhi,India;
³中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所,河北保定,071051)

[摘 要] 在喜马拉雅山脉地区,滑坡和其他物质的移动是严重的地质环境灾害。发生在锡金东喜马拉雅区(与西藏、尼泊尔及不丹接壤)的大规模滑坡,致使数万人死亡,从而造成了严重的灾难性损失。本文描述了对目前发生在印度、锡金甘托克的滑坡所进行的调查研究。重点强调了导致该区域内天然斜坡释放和坍塌的机理。认为区域内大雨不但有助于岩石块体快速侵蚀和风化,而且抬高地下水位,导致天然斜坡的稳定性降低。正在实施对滑坡的仪器设施计划(包括布置住宅沉降观测桩和测压仪),以预测区域内滑坡的动态。

[关键词] 滑坡 锡金 降水 风化 岩石节理

1.前言

喜马拉雅地区的一般特点是边坡陡峭、山峰高耸,且地质和大地构造条件复杂。锡金国的面积大约为 7300km²,长度距离从北到南约 100km,从东到西约 60km。该地区的海拔高程为 244~8534m,为世界第三高山——干城章嘉山(Mount Kanchenjunga)环绕。在锡金的喜马拉雅山区,发生滑坡十分常见,每年给该邦造成灾害的数量相当巨大。锡金每年有数百、有时是数千人员死于滑坡。仅 1968 年,33,000 多人被滑坡夺去生命。这些危急情况,促使位于挪威奥斯陆的挪威大地构造研究所(the Norwegian Geotechnical Institute)和印度新德里的中央土壤和材料研究站(the Central Soil and Materials Reseach Station),协同倡导了旨在研究该区域滑坡动态的公益性合作项目。

发生在锡金的滑坡,是沿着一处或多处含泥土和/或岩屑、或者基岩的松散面滑动的,但有时也沿岩石及其覆盖层移动。在滑坡和有滑坡倾向的地区,必须在详细的地质资料和岩土工程调查基础上,采用制止和预防措施。在分析一个滑坡时,重要的是确定破坏面的形成受何种因素控制,以及破坏面上的运动情况。这就要求进行滑坡块体稳定性工程分析和地质条件变化的分析,还须进行与滑坡活动相关的气象学分析。本文描述了上述发生于甘托克城的滑坡的调查实例,并论述实施缓解、控制灾害的措施。

2、锡金的地质概况

锡金的印度邦主要位于提斯塔 (Tista) 河分水岭地带 (见图 1a)。这里横贯喜马拉雅的山麓地带,受提斯塔河支流严重侵蚀。锡金的喜马拉雅地区滑坡频繁发生。导致这一现象的主要原因,是该区域的地质特征和强降雨所致。除这些原因外,当前的发展,特别是道路和房屋建筑,共同加剧了滑坡和地面沉降问题的影响范围。

从地质学角度讲,前寒武系的岩石覆盖了锡金喜马拉雅的主要部分。从最年轻到最老的主要岩层为下列 4 个层、组: 珠穆朗玛(Everest) 泥质岩层; 锡金(Sikkim)组; 纯尚(chungthang)层; 干城章嘉(Kanchenjunga) 片麻岩组。

锡金组岩层包括页岩和片麻岩(见图 1b)。东锡金主要受浅变质的岩石控制,主要为绿泥片岩、绢云母片岩和石英片岩。这些岩石具有千枚岩化现象。

喜马拉雅中心和东部的提斯塔河附近地区,被大规模的逆断层从北西朝南东移动。锡金东部的喜马拉雅被两条逆断层横穿,一个是称作为纯尚(chungthang)的逆断层,另一个是中心主逆断层(MCT),两者的走向均为 NW-SE。中心主逆断层(MCT)是著名的沉积岩和结晶质岩之间的区域构造边界,将“大”、“小”喜马拉雅分开,以碎裂岩和破碎带为其特征。纯尚逆断层包括纯尚层片麻岩和锡金组的片岩。本文关注的正是甘托克地区出现的这些片岩。

尼泊尔—锡金喜马拉雅和附近的外地槽地区主要受面向印度地盾的楔形层的断层(成对沿着走向滑动)控制。这个地带岩石的特点是强烈褶皱、变质作用,并挤入了许多构造地层单元,这一特点表现为伴有变质逆变现象的地层层序倒转。

3、气象情况

锡金位于喜马拉雅山区朝南的斜坡地带。该地区每年受到变化强烈的降水期的影响。首都甘托克城的年降水量相对较高(图 2),年平均 3539mm。从 4 月到 9 月的贸易风季节,连续强降水;而干燥季节出现在冬季中期。甘托克温差显著,但是很少出现冰冻。因而,当阿尔卑斯型或北极型气候盛行时,冬季的后期几乎没有融化水渗入地下。图 3 表明 6~7 月平均降水的峰值为 600mm,或者更多。在 1997 年 6 月,记录到的平均降水量高于此平均值(几乎达 1300mm,见图 3)。这是引起区内滑坡的主要原因。

由于斜坡的稳定性主要与强降水引起的水的特征相关,所以观察、测定 24 小时内强降水值是值得进行的。图 4 展示了甘托克地区 1960 - 1981 年期间的 24 小时异常值。这些数据表明,在该地区几乎每年都经常发生 24 小时降水量超过 100mm 的现象。

1997 年 6 月 7 日, 甘托克地区 24 小时的降水量约为 224mm。这次降水在该地区引发了许多滑坡, 造成了许多伤亡和财产损失。仅仅在这个月, 在这个区域 50 多人死于滑坡, 60 人严重受伤, 5000 个家庭受到影响。本文描述了对这次给区内造成最大损失的滑坡所进行的岩土工程调查, 并论述了控制滑坡的缓解措施的建议。

4. 滑坡的调查

在印度与挪威共同合作的公益性项目的支持下, 在锡金首都甘托克附近进行了滑坡调查。以下四个造成生命和财产显著损失的滑坡为调查重点: 坎玛瑞 (chanmari) 滑坡; 塔尚钦 (Tathangchen) 滑坡; 六英里 (Six-mile) 滑坡; 巴当 (Burdang) 滑坡。

采用 Vames (1978) 的滑坡分级法, 并经 Cruden 和 Vame (1996) 审查和更新。本文中的滑坡调查按综合特征描述, 然而不同区域的块体移动形式有所差别。坎玛瑞滑坡和六英里滑坡的边坡移动包括土滑和泥石流。塔尚钦滑坡和巴当滑坡的特点是复合的岩滑和泥石流, 边坡的运动是被位移物质流带动的、并继而引起的岩石块体沿其层理和片理滑动而爆发的。

图 5 展示了甘托克城坎玛瑞滑坡和塔尚钦滑坡的位置。六英里滑坡和巴当滑坡位于甘托克城南几英里处, 将在下文描述 (见图 1a 的滑坡位置)。

5. 坎玛瑞 (Chanmari) 滑坡

坎玛瑞地区位于甘托克的东部 (图 1a、图 5), 整个城市约 75,000 的居民中有数千人居住。从 20 世纪 60 年代起, 该地区就有滑坡倾向; 卫星图片的研究表明, 1967 年以前曾有过滑坡发生。目前, 边坡的运动主要为滑坡和泥石流。

图 6 展示了包括滑坡在内的堪玛丽地区等高线图。1997 年 6 月 8 日, 坎玛瑞滑坡曾有 1.5~2 万 m^3 混杂着风化岩石碎块的土壤以滑坡的形式排放。这个滑坡来源于坎玛瑞上部稍高处, 历经 5 小时强降雨 (降水 210mm) 之后发生的, 致死 8 人, 并毁坏了几处房屋和停置的汽车。这种强降雨在甘托克地区并非罕见, 该区日最大降水可达几百毫米。图 4 表明, 1974 年记录的坎玛瑞日最大降水为 503mm。

5.1 岩土工程调查

图 7 和图 8 分别为坎玛瑞滑坡纵剖面 and 近期滑动之后的图片。图 7 显示的剖面线 (A-B) 标注在图 6 滑坡等高线图中。调查后认为, 构成滑坡的土壤块体可能已接近饱和; 该块体沿 1990~1950m 标高的边坡陡峭部位, 向下滑动到坡度近 10° - 20° 的平缓、居住区边坡, 直至标高为 1890m 的公路为止。滑坡物源区的地形平均坡度是 31° (图 7)。在近期滑坡之后进行

的岩土工程调查表明，区域土壤的大部分表层是由混有大砾石和中等粒度、含风化云母片麻岩的砂质土组成的。其最表层部分（大约 2m 厚）为细粒并富含腐殖质。在这个场地打的钻孔（目的为安装测压仪）表明，各处的基岩深度均大于 20m。钻孔浅部揭露的岩石，主要由风化的石英云母片麻岩组成，而下部岩石为新鲜基岩。估计该区域的基岩上部在化学分解和物理崩解作用下已经变化并破碎。已分解的岩石，因其母岩固有的联结逐渐退化，其凭藉粘聚作用引起的内聚力因岩石物质的分解而显著降低。由于整个土层内聚力有限，在强降雨期间，如果不保护当地土体（即控制饱和度），极易受侵蚀影响。土的抗剪强度特征是由物质类型、密度、应力、渗透性等决定的。

5.2 试验、测试

对坎玛瑞滑坡，采集了扰动和非扰动土样进行实验室研究，包括粒度分析、渗透性实验室测试、化学分析和三轴剪切实验。表 1 显示了三轴剪切实验得出的剪切强度参数。

测试的土样主要为非塑性的细—中砂。这些样品进行了固结—非排水三轴剪切实验：这些样品首先固结，达到完全饱和后，在限值为 100、200、300kPa 的常压下进行剪切。总的粘合剪切强度（c）和剪切阻力的角（ ϕ ）的变化范围分别为 6~31Kpa 和 15.5° ~ 31.5° 。内聚有效应力变化范围是 0~23 kPa，剪切阻抗有效应力角的变化为 27.3° - 34.4° 。查明材料是半透水的，渗透系数在 1.94×10^{-4} ~ 5.325×10^{-4} cm/s 范围。渗透性在实验室用“水头压差法”测定。

表 1 三轴剪切实验的剪切强度参数

试样号	剪切强度参数				密度（kn/m ³ ）	备注
	总应力		有效应力			
	C（kPa）	（°）	C（kPa）	（°）		
1	6	29.4	0	34.4	16（密封的）	扰动样
2	12	31.5	0	34.2	16（密封的）	扰动样
3	11	28.9	0	32.1	16（密封的）	扰动样
4	31	15.5	23	27.3	9.2（现场干燥）	非扰动样
5	21	20.3	0	33.1	11.3（现场干燥）	非扰动样

上述结果表明，测试的土样的剪切强度并不异常低。然而在野外，除了土体的饱和度外，总存在地下径流的可能性，这使浅部土层中水的浓度趋近于饱和度。当在接近地表抽取地下孔隙水时，不久就会将强降水之后出现的浅层地下径流抽干枯竭。地下径流限制在土体物质的孔隙系统内；正如地表径流那样，地下径流也能被例如不透水层所阻挡。在水力传导系数降低的情况下，斜坡阻碍了地下径流，从而产生孔隙水压力。对于坎玛瑞滑坡场地而言，

在海拔约 2020m 处，观测到了溢出地表的地下径流（图 7）。由于该地区为住宅区，这股水流的成因和源头尚难确定，并且可以认为，人为地貌也会导致地下径流聚集。

从坎玛瑞滑坡表面破坏主要发生于浅层这点推测，造成边坡破坏的地下径流可能实际上属于浅部的。前已述及，当强降水过后不久，接近地下的岩层对孔隙水的吸纳能力可能已经耗尽，因而浅层地下径流将迅速增加；但因为坎玛瑞周围较大范围内正向下滑动，其深部地下径流不具备排泄的可能性。为此，正在执行由设置柱子（勘查石碑）和测压仪组成的仪器检测计划，分别用以监测地下运动和确定与气候相关的孔隙水压力的变化。这个计划将有助于预测该区滑坡的动态。

5.3 监测和缓解控制

因为滑坡的稳定性依赖于地下孔隙水的压力，在坎玛瑞上部（即其北部）使用 4 个测压仪进行的孔隙水压力测定计划正在进行。图 6 等高线图显示了这些测压仪的位置（p1 ~ p4）。其中测压仪 p1 ~ p3 位于沿滑坡的上端后缘，而 p4 布置在滑坡堆积的岩屑之下方。围绕滑坡区的表面，建立了测量点（混凝土构成的位移柱）网络，以记录地表运移情况。采用经纬仪大地测量方法施测，测定相对于选定的基岩稳定区的地表移动。在降水期间，以比常规测读周期更密的频度对滑坡进行监测。仪器测定的结果将与滑坡活动联系起来，将成为舍弃一些住宅或者临近的道路这一重要决策的组成部分。

在坎玛瑞北部进行的岩土工程调查，揭露了在近期新建成的排水渠内的一个裂缝网络，标注于图 7 中沿剖面的标高 2070 处。由于该区正在下滑，所以用弹性材料密封裂缝，防止在大雨期间过量的水渗透到土体中，这一举措是谨慎的。滑坡区未渗入地下的水，可用滑坡中部的水平渠收集。

在坡下正在建造排水渠。根据位于标高大约 1750m 处的测压仪 p4，发现地下总体处于缓慢蠕动状态。设计这些渠的目的，是汇集地表水并将其转移到主要河道（Lokchu Khola）中，（见图 6）。推荐使用具弹性的、类似石笼结构的材料来衬砌高容量水渠，目的是敷设不透水塑料膜。图 9 展示了建造在约 1750m 标高处的石笼。种植大量的树，例如桉树，可以除去土壤中大量的水，并有助于边坡的稳定性。众所周知，这样的树可以很大程度地减少浅层地下水的量；然而，如此做法，对依赖地下水源的农用土地将产生负面影响。

6. 塔尚钦（Tathangchen）滑坡

甘托克地区的塔尚钦滑坡位于朝东的一个斜坡坡面上，海拔高程 1850m（图 5）。锡金君主的王室宫殿横卧于在该滑坡上，其排水与坎玛瑞滑坡一样泄入同一谷地和河流。塔尚钦滑

坡的地总表面积约为 5 万 m^2 ；边坡坡度变化于 20° 至 30° 间。由于地表向坡下移动，引起了房屋损坏，海拔高程约 1500m 的一些地带已被放弃。观测皇室宫殿和 Lokchu Khola 河下游之间的部分地带，发现一部分受沿千枚岩叶理面的滑动影响，而另一部分则受上覆土体向坡下移动的影响。塔尚钦滑坡是这样一个合成滑坡，即由产生于沉降块体不同部位的上覆土体的移动和基岩的滑动联合作用形成。

塔尚钦滑坡周围存在两种不同类型的基岩。其下部（深部）由千枚岩组成；而上部（较浅层）则由十字石—暗红色页岩组成，并具有来自基岩风化物质的厚层覆盖土体。塔尚钦上下部的滑动岩石面为没有、或者极少有波状起伏的平滑节理面（图 10）。这些平滑的节理面在受剪的垂直方向上引发的崩塌可以忽略，其结果是，沿塔尚钦的岩石节理面必然极易发生滑动。

节理的粗糙度有助于预防沿节理的变形，这是值得关注的。几个作者已经建立了峰值剪切强度与节理粗糙度之间的经验标准。根据对沉积岩、火山岩和变质岩层内人工及天然节理进行的大量试验研究，存在如下关系：

$$\tau = \tan[JRC \log(\frac{JCS}{\sigma_n}) + \Phi_r] \quad (1)$$

式中 τ 为剪切强度； σ_n 为法向应力； Φ_r 为残余摩擦角；JCS 为节理强抗压强度；JRC 是节理粗糙度系数。

在这个判别式中，JRC 是节理粗糙度系数，它是在一定范围内、随着间隔“壁”表面粗糙度的增加而增大的粗糙系数，其变化范围约为 0~20。节理壁的抗压强度（JCS）可用施密特锤（Schmidt hammer）在饱和节理面上测定。以上方程清楚地表明剪切强度与节理粗糙度的直接相关性。沿不连续面的最大延展，也是节理粗糙度的函数；并遵循以下方程：

$$\Phi_d = 0.5JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) \quad (2)$$

由于在塔尚钦出露的岩石的叶理缝隙实际上是二维平面，其滑动近似于连续的，直到采取诸如锚固、支承、筑堤、排水及其他支撑岩石稳定性的措施为止。对塔尚钦上覆土体滑动采取的措施，与坎玛瑞滑坡中描述的举措相似。

7. 巴当（Burdang）滑坡

巴当滑坡地质特征已经熟知。滑坡位于朗博（Rangpo）镇附近，常常引起 31A 国家高

速公路中断。该国道公路的交通运输,连接锡金南部与首都甘托克和海拔稍低的印度次大陆地区(见图 1a, 朗博位置)。图 11 展示了这个滑坡的图像,它与坎玛瑞滑坡于同一天发生(1997 年 6 月 7 日暴雨后,5 个小时降水达 210mm)。滑坡发生在千枚岩层中,释放岩块的总体积在 10 万~20 万 m^3 之间。整个滑坡覆盖范围约 10 万 m^2 。由于滑坡的滑移,该区域的岩石破碎成类似土壤的物质,它包括来自母岩的巨砾和碎块。该滑坡的特征可描述为岩石滑动,滑动之后被碎石、岩屑物质取代。滑坡的平均坡度约 36° 。

7.1 岩土工程调查

巴当滑坡附近地区由被基性岩基侵入的变质砂岩和粘土(质)岩组成,这些基性岩基已经变质为变闪长岩和含滑石的千枚岩。厚层的风化岩石物质由砂和粉砂组成,它们覆盖于大多数的千枚岩层上。该区的地层层序见图 2。

在附近地带进行的岩土工程调查表明,千枚岩层含有与边坡平行的、陡倾斜的片理面。这些片理表面具起伏、粗糙的特征,起伏幅度为 20~50mm,长度超过 1~2m。在暴雨期间,由于水的强烈渗透,这些层理表面很可能变得饱和的而失去剪切强度。沿着这些不连续面,孔隙压力降低了有用的剪切阻力;当不连续面接近垂直后,水重量的增大导致岩石的有效作用力降低。在不连续的岩石块体中,水流途径是各向异性的,而受诸如间距、方位、缝隙和粗糙度等节理特征支配。流过岩石节理的水流相当于在光滑平行面间的层流。在这种场合,节理的渗透性(k)可引入等效光滑壁缝隙(e),以下列方程计算:

$$k = \frac{e^2}{12} \quad (3)$$

其最重要的差异,在于理论上的等效光滑壁缝隙(e)和实际上处于不规则节理壁之间的力学缝隙(E)差别。一般说来,在含水量相同时,若 E 明显的大于 e ,则意味着与光滑壁相比,粗糙壁的节理非有较大的缝隙不可。壁面摩擦及曲折的路径造成水流减小。

应当指出,等效光滑壁缝隙(e)和自然缝隙(E)是与节理的粗糙系数(JRC)相关的,其关系如下式(Barton, 1982),:

$$e = \frac{JRC^{2.5}}{\left(\frac{E}{e}\right)^2} \quad (4)$$

图 12 说明了以上经验关系。虽然粗糙度(JRC)有助于力学节理的剪切强度增加(见方程 1),但它对岩石节理的水力特性起反作用,导致节理水的孔隙压力增大,这一事实值得注意。沿着起伏和粗糙的节理千枚岩进行剪切时,沿节理能够产生使渗透性减小,而增加

孔隙水压力的断层泥。巴当滑坡可能就与这一情况相类似，在暴雨期间，孔隙水压力沿着不连续面增大，从而导致沿着这些面产生滑动。

7.2 检测和缓解

由于巴当滑坡是由富含粘性土的土体挟飘砾组成的，大雨能够触发滑坡块体，因此可能再次中断 31A 高速公路。没有可能对这个滑坡进行监测，主要问题是在大雨期间，其不稳定的泥石流的侵蚀变幻异常（图 11）。到底是清除整个泥石流？还是重建高速公路？假若边坡能够稳定的话，有考虑选择二者之一的可能。诚然，这种考虑是安全的，但是其费用却相当高昂，很可能要待相当长时期后才会取得成效，然而自从 20 世纪 60 年代起至今，这个区域就一直不停的在发生滑坡。

如前所述，作者对 31 号高速公路的每一侧的基岩作了更进一步的岩土工程调查。对推断、预测岩石块体的性能所需的岩土工程参数，进行了研究，以决定是否在滑坡下面修建一条隧道。采用 Barton 等（1974）的岩石-特性品质体系（rock-rating Q-system），研究了岩石块体的成分和特征。以下是从千枚岩的地表露头获得的大部分典型岩石块体的品质特征：

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} = \frac{75}{6} \times \frac{1.5}{6} \times \frac{1}{1} = 9.4 \tag{5}$$

式中：RQD 是岩石质量指标；J_n 是节理组数目；J_r 是节理粗糙系数；J_a 是节理变化系数；J_w 是节理水减小系数；SRF 是应力减小系数。

这个算式结果表明，在滑坡下面、在一个可能修建 300m 长的岩石隧道剖面内，岩体的品质是“相当好”的。然而同时应强调，沿着隧道长度方向的剪切带和岩体风化带也许减小上述计算的 Q 值。由于缺乏地下资料，这一点尚未予以考虑。

选择隧道方案有助于保持甘托克与低海拔地区之间的高速公路的常年通畅，提供解决沿这个路线长期滑坡问题的办法。在巴当滑坡这类主要交通向来受滑坡阻碍、制约的地区，应当权衡，修建隧道所取得的长期获利，可能超过与隧道开挖有关的短期高额资金投入。

表 2 朗博城附近的地质活动（Mukherjee 和 Rao1974）

土和冲积物	新近的
矿化后的断层和褶皱	第三纪的喜马拉雅的造山运动
硅化作用、岩石蚀变作用和硫化物矿化作用	
剪切、断裂	
变质作用	前寒武
岩基侵入	
主要褶皱和断层	

坡谷沉积	
------	--

8. 六英里滑坡

正如其名称所示，这个滑坡位于甘托克城南约 6 英里处。六英里滑坡也坐落于千枚岩层上，盖层含有滑石，且为蚀余土覆盖。滑坡损坏了大量的房屋，自那以后即被放弃。图 13 显示了因滑坡而废弃、地基经受了不同程度移动的房屋。在六英里滑坡的下部，尽管仍存活有大量的带根系植被（给土壤块体提供力学加固），但是应注意的是，临界破坏面却位于根系有效深度的之下。边坡移动可能是由与低摩擦(岩层)层面接触的土体滑动开始的。这个层面在滑坡的一些地段已经暴露。图 14 显示滑坡上的树木倾斜。在这个地区，观察到了来自基岩泉的地表下水流。这个水流的源头很难确定，因为该区的上坡居民住宅密度相当大；这样，渗漏水 and 降水能轻易渗入地下。按推测，这种渗漏已经延伸到了不可忽视的深度，导致了相对较厚层的块体破坏。与前文描述的边坡相比，该滑坡的边坡相对平坦（ $<25^{\circ}$ ）。

在滑坡下部，即图 14 显示的歪斜树的后面，已经建造了用混凝土浇注的排水渠，目的是汇集地表水。然而，由于地面差异移动，在这些用混凝土衬砌的渠道内已经出现了裂缝。按坎玛瑞滑坡的情况来说，使用钢筋混凝土和弹性绝缘材料，是应当有助于防止水从渠道内渗漏进入土体的。

9. 讨论

显然，甘托克附近地带的城市发展，已经改变了场地表面的自然特征和地形，人类活动促进增加了边坡不稳定性的不利影响。这类活动仅略举几例，包括道路、建筑、堤岸的开挖工程和排水工程。锡金天然非扰动的边坡也应该注意观察，修建用于汇水的排水系统也很重要，以减少边坡的移动。

该地区由于滑坡造成的社会经济损失相当巨大。相对于诸如锡金这样庞大的地质实体，虽然很难获得可靠的有关滑坡的总损失估算，但是按照已有的例子，可将经济损失谨慎的分类为直接和间接的费用损失。尽管一个如锡金国家 31A 高速公路的巴当滑坡这种大区域，其间接损失（诸如工业生产和农业生产的损失）极难评估，但总体看来，它与用于这一地区维护、修理以及财产损失相关的直接损失相比，无疑更为巨大。

10. 总结

锡金喜马拉雅邦频繁发生滑坡这是因强降水的缘故。强降水不仅有助于岩石块体的快速侵蚀和风化，而且还提高了地下水位，使天然边坡的稳定性降低。这些因素，加上日益增长的与城市发展相关的人类活动，使得该区边坡的不稳定性增加。

在这些受影响的区域进行的岩土工程研究表明,在滑坡活动期间,上覆土体和基岩的不连续节理面两者都在活动。因为沿着节理面,孔隙水压力增加,沿着不连续面滑的移动已经发生。光滑的和粗糙的节理两者都受增加的水压力(强降水造成的)影响。上覆土体的滑动与土体孔隙的饱和度以及浅层和深层地下径流有关,这种地下径流在边坡物质内产生孔隙水压力。

为了监测和控制滑坡的灾害,探索了几种缓解的方法。监测技术包括用测压仪测量孔隙水压力,和用三角测量的手段对位移柱进行地面移动的测定等手段。限制灾害的措施包括排水渠(用弹性的物质加衬)的建造和维护、种植植被、修建隧道和在受影响的区域内控制人群的活动等。