



地震与滑坡



中国科学院成都地理研究所

向全国科学大会献礼

地震与滑坡

中国科学院成都地理研究所

1 9 7 8

前 言

我国是一个多地震的国家,历史上曾发生过许多次强烈地震,在各种自然灾害中占着相当突出的地位。强烈地震诱发的滑坡等重力现象,能够造成建筑物的毁坏和人员的伤亡。在山岳地区,地震滑坡崩塌等造成的损失,往往大于地震本身造成的损失。一九二〇年宁夏海原地震、一九三三年四川迭溪地震、一九六〇年智利地震、一九六四年美国阿拉斯加地震就是很好的例证。一九七四年云南昭通地震和一九七六年四川松潘—平武地震也都出现类似的情况。

为了防御地震灾害,我国劳动人民对它不断地进行斗争,取得了丰实的经验。解放以后,在伟大领袖毛主席和周总理的亲切关怀下,经我国人民和地震工作者的努力,对地震的认识和震灾的抗御能力有了很大的进展,特别是在地震的预测预报方面取得了可喜的成绩。成功地预报了辽南、龙陵、松潘—平武和盐源—宁浪等四次强烈地震,使这几次地震造成的损失大大减少。今后随着地震预报的准确性的提高和抗震工程措施的加强,地震作用本身造成的人民生命和财产的损失将有所减少,而地震滑坡等造成的损失将有相对增加的趋势。如果忽视对地震滑坡的研究,将会给震区人民造成很大的危害。

近几年来,国外对这方面的研究工作十分重视,陆续发表了不少的论文和资料。在国内这方面的研究工作开展较少。为了研究地震与滑坡的关系、震区自然环境对地震诱发滑坡的影响、地震滑坡的成因机制和地震滑坡的预测,为防震抗震和震区的建设提供可靠的资料和科学依据。我室于一九七三年开始,先后组织二十余人对四川炉霍、云南昭通、云南龙陵、河北唐山、四川松潘—平武等强震区进行了地震滑坡的科学考察工作。现在,为了向全国科学大会献礼、为了促进防震抗震工作进一步的发展,我们对以往已发表过的文章以及新的研究成果重新整理,汇编成《地震与滑坡》,这是我室近几年集体劳动的成果。除文章已署名的外,参加工作的还有吴其伟等同志。全部图件由邱洁华、何耀灿、李春荣等同志绘制。限于我们的水平和经验,难免有不当和错误之处,恳切希望广大读者批评指正,以便补充和提高。

滑 坡 研 究 室

一九七八年元月于成都

目 录

前言

地震与滑坡的关系研究及地震滑坡预测的探讨

.....李天池 (1)

炉霍地震滑坡调查

.....炉霍地震调查组 (23)

昭通地震区的山崩和滑坡

.....王成华、陈自生 (39)

龙陵地震滑坡调查

.....陈富斌、李钟武 (53)

唐山地震区的液化滑坡

.....李天池、陈自生、李明华 (89)

松潘—平武地震区崩塌和滑坡的若干问题

.....李天池 (101)

地震滑坡和崩塌的典型照片

..... (113)

地震与滑坡的关系研究 及地震滑坡预测的探讨

李 天 池

强烈的地震作用能诱发滑坡和崩塌，前者我们称之为地震滑坡，后者称之为地震崩塌。

强烈地震发生时，一方面由于地面强烈振动引起建筑物的破坏和人员的伤亡，另一方面地震诱发的滑坡和崩塌等重力现象也能造成建筑物的毁坏和人员的伤亡。在我国的一些山区，地震时滑坡和崩塌造成的损失，往往大于地震本身造成的损失。因此防御地震滑坡和崩塌的危害已成为防震抗震的一个重要问题。

为研究地震滑坡和崩塌等重力现象，我们曾对一九七三年二月六日四川炉霍地震、一九七四年五月十一日云南昭通地震、一九七六年五月二十九日云南龙陵地震、一九七六年七月二十八日河北唐山地震及一九七六年八月十六日四川松潘—平武地震进行了实地考察。本文将在上述考察资料的基础上，结合历史地震资料和部分国外地震资料，对地震及震区自然环境对滑坡和崩塌的影响、地震滑坡的机制及地震滑坡和崩塌的预测等问题作初步的探讨。文中着重讨论滑坡问题，附带讨论崩塌及其他重力现象。限于作者的水平，在分析时难免有片面和错误之处，请批评指正。

一、地震滑坡和崩塌的危害

强烈地震期间，地震滑坡和崩塌等重力现象造成的巨大危害以前并没有引起人们的重视。其原因一方面是没有把地震本身造成的危害与地震滑坡和崩塌等重力现象造成的危害区分开来；另一方面是对地震滑坡和崩塌等重力现象缺乏研究。为了说明地震滑坡和崩塌的研究在防震抗震方面的重要意义，现将地震滑坡、崩塌危害的部分事例略述如下：

一七一八年六月十九日，甘肃通渭南地震（ $M=7.5$ ），通渭城北笔架山一山峰崩塌，山地土山多崩，城乡压死40,000余人。甘谷北山南移（滑坡），掩埋永宁全镇及礼辛留一部分，死伤30,000余人⁽¹⁾。

一七九三年五月二十一日，日本九州岛发生强烈地震，约5.35亿立方米的土石自前山东坡下滑2,700米落入有明海湾。滑坡引起海啸，高达10米的涌浪使海湾沿岸80公里的地带被破坏，死亡15,000余人⁽²⁾。

一九三三年八月二十五日，四川迭溪大地震（ $M=7.4$ ），迭溪千年古城即时为地震滑坡和崩塌所毁灭，500余人随之丧生。迭溪城南5公里岷江东岸之小关子亦为一个滑坡所毁，使

57人死亡。岷江西岸的烧炭沟、吉白沟、龙池、石咀等十余个村寨，地震时皆随山崩倒。其中靠近岷江的烧炭沟、龙池、白腊等村寨，则完全崩入江中，踪迹全无⁽³⁾。

在迭溪附近，岷江两岸山体崩塌，堆积成三座高达100余米的天然堆石坝，将岷江完全堵塞，积水成湖，共蓄水约4~5亿立方米。当年十月九日最下面一个堆石坝溃决，高达40余米的水头顺河谷奔腾而下，席卷着两岸的村镇。自迭溪城起至灌县止，长约200公里的岷江两岸的村镇为之冲毁大半。据不完全统计，死于水灾者达2,500余人，物质损失更不计其数。

一九五〇年八月十五日，西藏察隅大地震（ $M=8.5$ ），崩塌、滑坡堵断河流形成湖泊，震后八天溃决，高达7米的巨浪淹没成干个村庄，死亡人数为地震的三倍以上⁽⁴⁾。

一九五八年七月九日，美国阿拉斯加州发生强烈地震，里图雅湾岸坡产生滑坡。约3050万立方米的土石滑入海湾激起巨大涌浪，滑坡区对岸浪高520米，冲毁森林10平方公里，使停泊在海湾口的二艘渔船沉没⁽²⁾。

一九六〇年五月二十一日到六月二十二日，智利发生几次大地震（ $M=8.5$ ），地震造成数以千计的滑坡和崩塌，滑坡堵塞了河流，造成严重的灾害。在瑞尼赫湖区发生三次大的滑坡（分别为300万、600万和3000万立方米），滑坡堆积于湖中，使湖水上涨24米，湖水溢出淹没了湖西65公里的瓦尔迪维亚城，水深2米⁽⁵⁾。

一九六四年三月二十七日，美国阿拉斯加地震（ $M=8.6$ ），地面产生大规模变形，大片地面滑动、陷落和崩塌。此次地震中大多数的伤亡由海啸所造成，而物质损失的极大部分是由滑坡造成的。如克赖依湖四周九个三角洲产生陆地和 underwater 滑坡。水下滑坡最大体积约16万立方米，其引起的回浪高达9米，远浪最大高达24米，致使沿岸许多建筑物被毁⁽⁶⁾。

一九七〇年五月十四日，苏联苏拉克河地区发生强烈地震（ $M=7.5$ ），产生多处岩石滑坡，在契尔盖依拱坝上游1公里，滑落土石300万立方米，将苏拉克河堵断，造成很大的损失⁽²⁾。

一九七〇年五月三十一日秘鲁地震（ $M=7.7$ ），绝大多数人员的伤亡系由滑坡、崩塌和泥石流所造成的。来自瓦斯卡兰山北峰的大规模的滑坡和崩塌，使扬盖镇和潘雷赫卡的一部分连同其18000人皆被滑坡和崩塌所埋葬。其伤亡人数占这次地震受害者总数的40%，成为南美洲地震史上的空南事件⁽⁷⁾。

一九七六年八月十六日至二十三日，四川松潘——平武地区发生三次强烈地震。这三次强烈地震由于预报的准确，震前当地居民已撤离建筑物，所以地震时房屋倒塌并未造成居民的伤亡，绝大多数的死伤系由崩塌、滑坡和泥石流所造成。

地震时在浅海大陆架上诱发滑坡能够破坏海底电缆、海底工程及深海油田的勘探与开采。如一九二九年十一月二十九日纽芬兰格兰德砂砾浅滩的外海发生7.5级强烈地震，震中在水深1800米到3600米的大陆坡上。地震时产生面积达20平方公里、平均厚20~30米的海底滑坡，使水深2750米到3300米之间的全部通讯电缆折断。此后该滑坡转化成浊流，以每秒28.3~19.1米的速度顺大陆坡向深海奔袭，在其前进方向的通讯电缆依次先后折断。最后一条通讯电缆在水深5230米处，距震中480公里⁽⁸⁾。

上面简述的一些事例说明：地震滑坡和崩塌等重力现象及其预测对于防震抗震的重要意义。从这一角度出发，地震预测预报只是防震抗震的一个重要方面，如果只重视地震发生的

时间和地点的预测，而忽视对发震地区可能产生的滑坡和崩塌的预测，地震时仍会给人民的生命和财产造成重大损失。

二、不同震区地震滑坡和崩塌的主要特征

强烈地震诱发滑坡和崩塌的数量，不仅取决于地震本身的影响，而且与发震地区的地质地貌条件和发震时的降雨、融雪等各种因素密切相关。不同地区的地震其诱发滑坡和崩塌的特点也不相同。

（一）宁夏海原地震区（1920.12.16， $M=8.5^*$ ， $I_0=X11^{**}$ ）

这次地震是我国近代历史上最大的地震之一，极震区在现在宁夏回族自治区海原一带，为陇中黄土丘陵地区。在第三纪粘土质页岩及震旦纪变质岩的基层之上，广泛分布着早、中更新世的老黄土和晚更新世的新黄土（马兰黄土）。

强震发生时，产生北偏西 $50\sim 70$ 度，全长200余公里的断裂带。在干盐池附近，该断裂带有强烈的垂直运动，迫使一个湖泊向下降盘一方迁移⁽⁹⁾。由于震级高和震区新黄土广泛分布，地震滑坡和崩塌十分普遍。海原县一个长达1里多的山体完全崩塌。在西吉和固原一带的清水河与葫芦河的分水岭地区，黄土滑坡十分普遍。自甘肃静宁的西部到会宁的东面，几十公里的范围内，大型的滑坡和崩塌有几十处之多。在响河上游的会宁清江驿附近，有二个山体一齐滑动和崩落，将响河长约2500米的河床完全壅塞，而且越过河道，堆积于河之对面，高出地面约20余米。据资料⁽¹⁰⁾介绍，这次地震，在面积为100平方哩的黄土沉积地区发生流动滑坡，夺走了约20万人的生命。

（二）四川迭溪地震区（1933.8.25， $M=7.4$ ， $I_0=X^+$ ）

此次地震为龙门山区最大的地震之一，震区岩层多为变质岩系，构造比较复杂。岷江由北而南流经震区。岷江及其支流侵蚀强烈，形成千余米的“V”型谷。由于谷窄坡陡，岩层破碎，地震时山体破坏十分严重。在迭溪周围15公里范围之内，滑坡和崩塌到处可见，原有地貌完全改观。大规模的滑坡和山崩堵河现象为其他震区所少见。

规模最大的滑坡为迭溪城和点将台之间的砾石阶地滑坡。滑动方向长400米，宽1300米，滑动土石体约1亿5千万立方米。迭溪城南之小关子滑坡亦长达500余米。迭溪城下、大桥、银屏崖等地，岷江两岸山体崩塌，形成三座高达100余米的天然堆石坝，将岷江截成三段，江水受阻积水成湖（当地俗称海子）。由于迭溪城下的堆石坝高出大桥和银屏崖堆石坝60余米，所以当时三个湖连成一片，蓄水4~5亿立方米。震后45天最下面一个堆石坝溃决，而大小海子至今尚存（图1）。除了上述的海子之外，这次地震在岷江的支流中还形成十余个海子，其中较大的有公棚海子，水磨沟海子，白腊寨海子等。这些海子由于泥沙淤积较厚，现在已蓄水不多了。

据茂州志所记之地震史料中，有三次述及地震时山崩川塞之事，可见地震时山崩堵河积

* M ——震级，下同。

** I_0 震中烈度，下同。

水成湖的现象，早已成为该区地面破坏的显著特点。

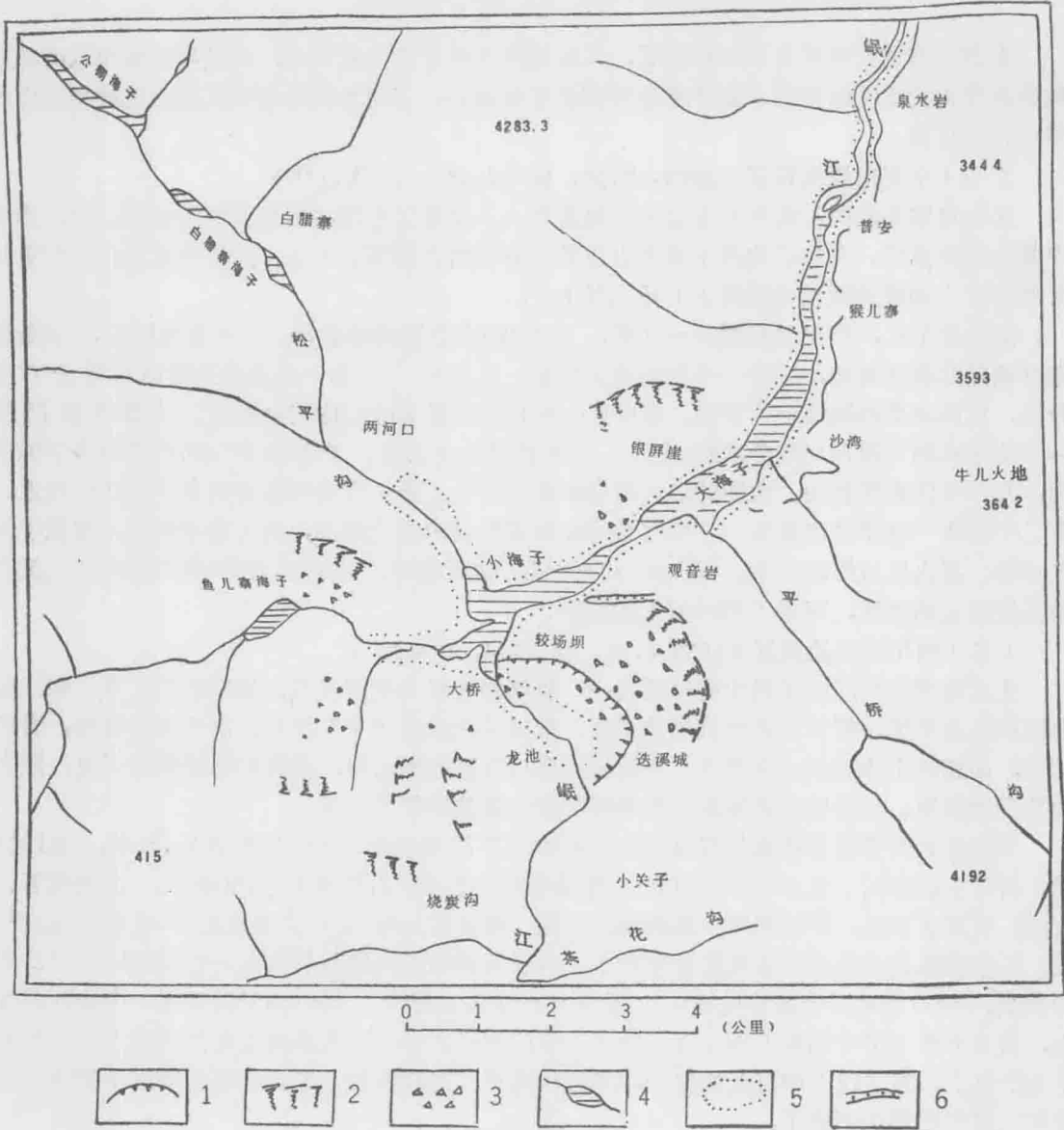


图 1 选溪地震时诱发的滑坡崩塌及堰塞湖（海子）

1.滑坡, 2.崩塌壁, 3.崩塌堆积物, 4.堰塞湖（海子）, 5.选溪堆石坝
溃决前的水面线, 6.地震断层（？）

(三) 四川炉霍地震区 (1973.2.6, $M=7.9$, $I_0=X$)

震区位于川西山原东部鲜水河谷中的炉霍一带。地震时产生北 50° 西方向的长达90公里,宽20~150米的地震构造裂缝带。滑坡和崩塌等重力现象的分布受此裂缝带和鲜水河谷的控制,集中分布在仁达至朱倭之间宽1~2公里的带状范围内,以类黄土中的浅层小型滑坡为主,厚层的大型滑坡较少,基岩滑坡罕见。滑坡多产生在沟谷谷肩以下 $31^\circ\sim 50^\circ$ 之间的陡坡地段。高原面和河谷阶地上坡度平缓($<30^\circ$),滑坡和崩塌极少。震区未出现滑坡和崩塌堵塞河流的现象。

(四) 云南昭通地震区 (1974.5.11, $M=7.1$, $I_0=1X$)

震区在西南高山高原区的东北部边缘,金沙江南岸支流的山地中。这次地震出现的地面破坏以崩塌、滑坡和泥石流等现象为主,未见地面构造裂缝。崩塌和滑坡受北东向新田断裂带和东西向木杆——太平山断裂带的控制,集中分布在木杆河、桧溪河、丁木沟等陡峭河谷的两岸。滑坡绝大多数发生在第四纪残坡积层和玄武岩的风化壳中,仅见一处基岩顺层滑坡。崩塌多发生在风化强烈、节理发育的二迭纪灰岩、玄武岩和三迭纪的砂页岩中。由于震后降雨,促使滑坡进一步的发展和泥石流的爆发。在木杆河、桧溪河和丁木沟见有三处滑坡、崩塌和泥石流堵河现象。此次地震崩塌、滑坡、泥石流造成的人员伤亡和物质损失约占此次地震总损失的40~50%。

一九七四年七月八日凌晨2点40分,在老寨堡南1公里处发生一次巨大的崩塌。崩塌前曾在老寨堡附近大槽村一带发生一次2.6级的小余震,震后5分钟开始崩塌,崩塌极为迅速,转瞬间巨大石块往山坡下倾泻,击毁了山下原有的老崩塌平台,新老崩塌体一起往下滑动,流入低洼沟谷,在其末端形成泥流,整个崩滑体长约1.5公里⁽¹¹⁾。这是主震之后余震诱发大崩塌的一个特例。

(五) 云南龙陵地震区 (1976.5.29, $M=7.4$, $I_0=1X$)

此次地震发生在具有准平原面的滇西高原和强烈侵蚀切割的滇西山原之间的分水岭地带。震区的地面破坏以大量的地震重力裂缝带、大面积的表层剥落和浅层崩塌性滑坡群为典型特征。地震时直接诱发的典型的大型滑坡很少。在花岗岩、变质岩和玄武岩的残坡积层组成的陡坡地段,地震时产生的大量地震重力裂缝和剥落,在震后降雨的促进下,产生大量小型浅层崩塌性滑坡群,在葫芦口河上游地区,这种滑坡成片分布。震区原有的一些老滑坡,震后有一定程度的复活。发源于极震区的苏帕河、广下河及芒市河的上游有浅层崩塌性滑坡群的地区,在大量降雨的诱发下,七月至九月分普遍暴发了泥石流。主震之后产生的大量滑坡和泥石流给灾区人民带来新的灾害。

(六) 河北唐山地震区 (1976.7.28, $M=7.8$, $I_0=X1$)

震区位于燕山南麓低山丘陵和华北平原的交界地区。在极震区的唐山市吉祥路、礼尚庄一带产生北 30° 东断续长8公里的构造裂缝。使人感到意外的是这次强烈地震没有产生基岩滑坡,在长城以南的广大低山丘陵地区崩塌也很少见。这可能和低山丘陵地区山体高差小坡度缓,基岩裸露等因素有关。在震区南部的冲积平原和滨海平原地区,由于地下水位高(0~3米),第四纪全新世以来沉积的松散的粉细砂层被水饱和,地震时造成大面积砂层液化和喷水冒沙。在河流岸边,堤坝和路基两侧以及 $>10^\circ$ 的斜坡地段,造成大量的液化滑坡成为这次地震滑坡的主要特征。天津碱厂白灰堰漂移型滑坡是前几次地震中所未见的一种液化滑

坡类型。

(七) 四川松潘——平武地震区 (1976.8.16, $M=7.2$, $I_0=IX$)

松潘——平武地震发生在由四川盆地向松潘高原过渡的中高山区。震区未见构造地裂缝, 表层剥落、滚石、崩塌、滑坡和泥石流现象十分普遍, 给人有遍体鳞伤之感。滑坡和崩塌受南北向的小河—叶塘断裂带及涪江、黄羊河、虎牙河等河谷的控制。崩塌和滑坡较多的地区, 主要在松潘县观音岩以东, 平武县王坝楚, 水柏以西, 牧羊场(王朗)以南, 四洱公社以北的中高山区, 尤以龙潭铺——小河——丰岩、草源及虎牙关等地最为严重, 其中有些地方崩塌和滑坡连续分布、长达几公里。大型崩塌多产生在破碎的厚层灰岩及白云母斜长石花岗岩中, 而大型滑坡均产生在断层破碎带及变质岩中。堆积层中滑坡的规模较小。地震时正值雨季, 崩塌和滑坡促使泥石流的爆发。涪江、白马河、黄羊河都曾被崩塌、滑坡和泥石流堵塞, 形成六处堰塞湖。此次地震崩塌、滑坡、泥石流所造成的危害超过了地震本身造成的危害。

此外, 一九六六年三月八日河北邢台地震 ($M=7.2$) 和一九七五年二月四日辽南地震 ($M=7.3$) 也造成一些液化滑坡, 其发生部位和形成条件与河北唐山地震相似。一九七〇年一月五日云南通海地震 ($M=7.7$) 形成20余米宽、60公里长的北西向的构造裂缝带。在极震区内崩塌和大小滑坡常见, 竹居河大滑坡滑下32000立方米, 堵河成湖。从总的情况看, 通海地震和炉霍地震造成的地面破坏大致相似。

三、地震作用和震区的自然环境对地震诱发滑坡和崩塌的影响

(一) 地震作用的影响

就地震对诱发滑坡和崩塌的影响而言, 由于地震强度、地震频率和持续时间、震源机制及其深度的不同, 可能产生如下几方面的影响:

1. 由于地震的加速度, 使斜坡土体承受地震惯性力;
2. 地震断层的错动和滑移造成地表变形和裂缝;
3. 在震源应力场内引起岩石膨胀和水的扩散作用, 使地下水位发生变化;
4. 由于土石振动使其力学强度指标发生变化。

根据对近几年几次强震的调查, 可以知道极震区地面运动的实际情况是十分复杂的。由于地震的加速度造成的惯性力, 不仅随距震中的距离增大而减小, 而且随震区的地质、岩性、地下水的情况而变化, 所以至今尚不能建立一个满意的地震——重力位移之间的数学模型。在现在强烈地震加速度记录很少的情况下, 只能以地震的宏观烈度作指标进行统计分析。表1列出了最近几年发生的强烈地震的调查结果。从表中可以看出, 90%以上的滑坡都分布在VII度以上的地区。VI度区滑坡很少。

强烈地震可以造成大面积的地形变化, 使局部地形升高或降低, 由此引起坡体内部软弱面角度的变化。对于处于极限平衡状态的坡体来说, 软弱面角度的很小变化, 就足以破坏坡体的稳定而诱发滑坡和崩塌的发生。哈德利(1964)曾描述过这样的一个事例, 赫布根地震 ($M=7.75$, $I_0=X$) 使一个稳定了的滑坡的滑动面的角度增大了23分, 它破坏了滑坡原有的平衡而在震后开始滑动⁽¹²⁾。

表 1

不同烈度区滑坡和崩塌的统计

地 震 百 分 数 烈 度	V	VI	VII	VIII	IX	X
四 川 炉 霍				3.0	27.0	70.0
云 南 昭 通			25.0	14.3	60.7	
云 南 龙 陵			52.0	48.0		
四川松潘—平武		6.0	53.0	41.0		

一九七四年五月十一日云南昭通地震后,国家地震局地震测量队在震区进行微波复测,测边布于震中周围,极震区大部分落在测网内(图2)。与震前(1958~1962)的测量结果相比,其变化情况及线应变列于表2:

表 2

复测结果及各测边线应变

测 边	l_0 (米)	l (米)	Δl (米)	线位变 ε
AB	19813.93	19813.60	-0.33	-1.67×10^{-5}
AC	15788.99	15788.84	-0.15	-9.56×10^{-6}
AD	12231.42	12230.90	-0.52	-4.24×10^{-5}
BC	17604.00	17603.74	-0.26	-1.48×10^{-5}
BD	28556.61	28555.46	-1.15	-4.03×10^{-5}
CD	15622.15	15621.66	-0.49	-3.14×10^{-5}

(据国家地震局地震测量队资料)

经计算整个测区平均面积变化率 $\Delta = -4.46 \times 10^{-5}$,收缩面积 1.3×10^4 平方米,其中极震区ACD三角形面积收缩最剧。云南省公路局在震后对海口木杆河公路桥进行的复测结果表明,地震使得公路桥附近地面倾斜 $1^\circ 40'$ (视倾斜)⁽¹³⁾。震区如此大的水平和垂直变形对坡体的稳定必然产生不利的影响,极震区海口附近滑坡和崩塌大量出现,上述地面变形可能起了重要的作用。

根据震源应力场岩石膨胀性和水的扩散作用的研究⁽¹⁴⁾,地震发生前很长一段时间,地下水以从震中区向外扩散流出为主,到震前变为向震中区流进为主。因为从更远处补充进来的地下水超过了扩散出去的水,从而地下水得到补充,地下水位强烈上升。在临震前地下

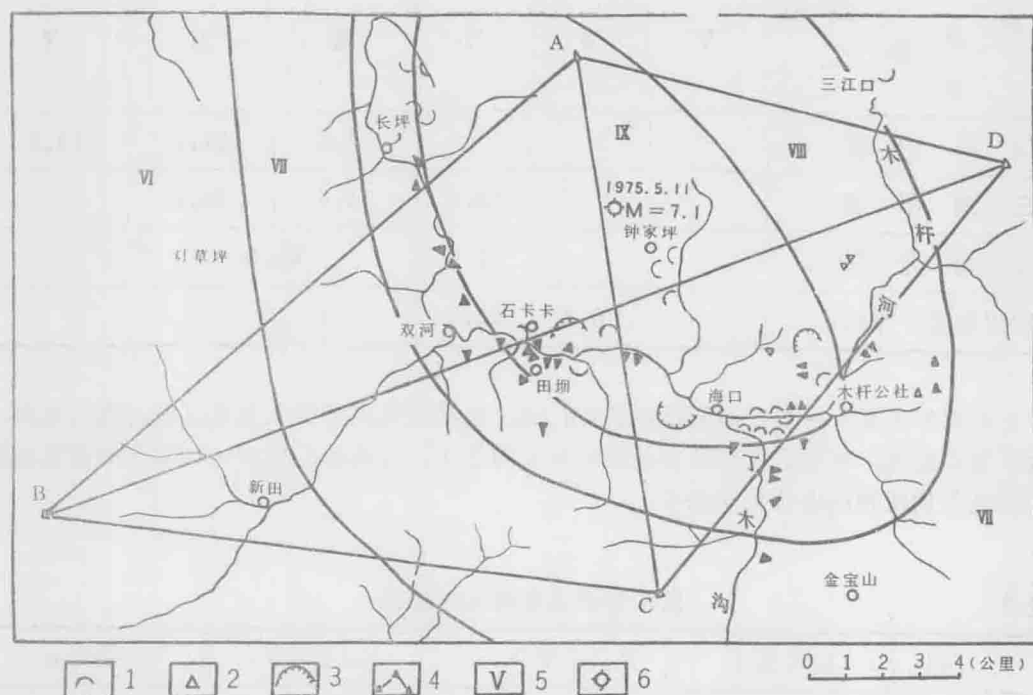


图2 昭通地震地面变形和滑坡与崩塌的关系

1.滑坡, 2.崩塌, 3.古滑坡洼地, 4.三角边长复测线, 5.烈度, 6.震中位置。

水的上升达到高潮。如一九二〇年十二月十六日海原大地震发震时正值缺雨的旱季, 发现固原、隆德、靖远等县境内, 有四处井水临震前强烈上升震后复原的现象⁽⁹⁾。一九七六年七月二十八日唐山地震前5天, 唐山市、丰南县、滦县等地区发现地下水位强烈上升, 有的水井震前水喷出地表2~4米。其他如一九七四年五月十一日云南昭通地震和一九七六年八月十六日四川松潘——平武地震也都发现类似的情况。震前地下水位强烈上升, 不仅使孔隙水压力增加, 而且又软化土石, 使其强度降低。一九二〇年十二月十六日海原大地震时, 大量的黄土滑坡发生, 震前地下水的上升可能起了促进作用。资料(10)介绍, 海原地震时在面积为100平方哩的黄土沉积地区产生流动滑坡。在缺雨的冬季黄土高原地区地震时产生流动滑坡似乎使人困惑不解。如果考虑到地震前地下水大面积上升, 黄土层下部被饱和, 地震时黄土层产生液化, 导致流动滑坡大量出现, 这种现象就不难理解了。

(二) 震区的自然环境对诱发滑坡和崩塌的影响

震区的自然环境, 诸如地质、地貌、降雨和地下水等对地震时诱发滑坡和崩塌等重力现象有十分明显的影响。一九七四年五月十一日云南昭通地震 ($M=7.1$) 和一九七六年八月十

六日四川松潘——平武地震 ($M=7.2$) 没有一九七三年二月六日四川炉霍地震 ($M=7.9$) 和一九七六年七月二十八日河北唐山地震 ($M=7.8$) 的震级高, 但前两次地震诱发的滑坡和崩塌的规模和数量远比后两次地震多, 其原因就是因为震区自然环境的影响。

1. 地质条件的影响

地质条件的影响最主要的反映在斜坡的结构类型和土石性质二个方面。

自然斜坡并不是整体一块, 而是由各种各样的结构面和结构体这样二种单元组成的。结

表 3 岩体的结构类型和地震诱发的重力现象

类		亚 类		主 要 的 特 征			地震时容易诱
代号	名称	代号	名称	地 质 类 型	主 要 结 构 面	结构体的形状	发的重力现象
I	整体块状结构	1	整体结构	岩性单一的厚层沉积岩和火成岩、侵入岩、变质岩等, 构造变形轻微	小节理、隐裂隙和劈理等	巨型块状	岩体稳定性好, 地震时一般无变形
		2	块状结构	岩性同上, 构造变形轻微到较强烈	大的节理和发育的劈理、片理为主。不发育的破碎带	块状、柱状、菱块状	掉块、滚石和小型崩塌
II	层状结构	3	层状结构	层厚大于20~30厘米的沉积岩和沉积变质岩, 构造变形较强烈	层理、片理、节理发育, 有比较发育的破碎带	短柱状、矩形、板状	崩塌和顺层滑坡
		4	薄层状结构	同 3, 但层厚小于20~30厘米	同 3, 有较多的软弱夹层和层间滑动	板状、片状	剥落、崩塌和顺层滑坡, 有连通的破碎带时产生切层滑坡
III	碎裂结构	5	镶嵌结构	侵入岩、非沉积变质岩或受构造挤压破碎的各种岩体	各种比较大的结构面彼此穿插, 互相切割	菱形、锥形及其他不规则的形状	剥落、崩塌、滚石
		6	层状碎裂结构	构造变形强烈的火成岩、变质岩、复理石建造、褶皱强烈的层状岩石、有一系列的平行断层和破碎带	断层、破碎带、层间错动、大型平行节理均较发育	碎块状、片状、颗粒状	剥落、滚石、崩塌和滑坡
IV	散体结构	7	散体结构	各种岩石的断层破碎带和风化破碎带	各种各样的节理、裂隙十分发育、断层带十分破碎、岩石松散	鳞片状、碎屑状、颗粒状、粉状	大量的裂缝、剥落、崩塌和滑坡都很发育

构面是指不同成因、不同性质、不同规模的各种地质界面，如断层、节理、裂隙、层面等。结构体是指由不同产状的结构面相互切割而成的各种土石块体，其大小和形态各不相同。存在于斜坡内部的各种结构面和结构体的组合不同，使斜坡具有各种不同的结构类型。常见的结构类型有整体块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构四类。斜坡的这种结构特性就决定了其受力状态的差异，在地震力的作用下产生重力裂缝、崩塌、滑坡等各种不同的重力现象。斜坡岩体的结构类型和地震时最容易产生的重力现象如表 3 所示。

岩土性质对地震诱发滑坡和崩塌的影响是显著的。对一定的震级来说，不同土质的最大加速度和振动幅度都不相同。瑞德曾应用在地震影响下不同土质的最大加速度与坚硬岩石最大加速度的比值，来衡量土层的振动特征（见表 4）。

表 4 地震影响下不同土质的最大加速度与坚硬岩石最大加速度的比值

土石名	坚硬岩石	砂 岩	冲积土、砾石、碎石、沙土、泥炭土	粘土、黄土、灰泥垆	天然堆积土、人工填土	湿地、沼泽、内陆湖
比值	1	1~2.4	2.4~4.4		4.4~11.6	12

最近几年来在几个强震区调查所见，百分之九十以上的滑坡产生在各种松散堆积层中，岩石滑坡极少。由表 4 可以看出，基岩中的加速度和振动幅度小，松散的堆积物中地震的最大加速度和振动幅度都较大，因而前者不容易产生滑坡，后者容易产生滑坡。

应当特别引起注意的是新黄土、高灵敏度的粘土、被水饱和的松散的粉细砂层。我国南北地震带北段黄土高原和丘陵地区，地震时诱发滑坡和崩塌最多，新黄土的物理性质和水理性起了很大的作用。高灵敏度的粘土和饱和水的松散粉细砂层，在地震力的作用下，易于产生触变和液化，丧失其抗剪强度而导致滑坡的发生。如唐山震区 VII 度以上烈度区的液化滑坡和一九六四年美国阿拉斯加地震时破坏安科雷奇市的大部分滑坡，皆起因于此⁶。

2. 地貌条件的影响

地貌条件对地震滑坡和崩塌的影响，除区域地貌条件，即河流和沟谷的密度，总的地形起伏等因素外，主要应考虑二个方面：其一是坡度和坡高的影响；其二是坡形的影响，但前者的影响远较后者为大。在地震时斜坡上的振动振幅随着高度有所提高，运动的垂直分量改变不大，垂直于谷边的平面上的水平分量改变最大。改变的性质取决于振动频率、振动传来的方向、斜坡的坡度和峡谷的深度。斜坡上的测震观测结果指出⁽¹⁵⁾：1) 斜坡上的地震烈度相对于谷底约增加 1 度左右；2) 在角度超过 15° 的截圆锥状的山体的上部点的位移幅值与其下部幅值相比，其局部谱段值增加高达 7 倍；3) 黄土坡阶地的幅值比底部约大 4 倍左右，比离开坡阶边缘 25 米的水平平面处约大 2 倍左右。

四川炉霍、云南昭通和四川松潘——平武等震区地震滑坡与坡度的统计关系如图 3 所示。从中可以看出，坡度在 20° 以下的斜坡滑坡很少，在 50° 以上的斜坡上滑坡也少，绝大多数滑坡都发生在 30°~50° 的斜坡上。云南龙陵地震区所有的浅层崩滑体受地震——重力型地

裂缝的控制，均产生在 $38^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的斜坡地段。地震崩塌则多发生在 $>30^{\circ}$ 的斜坡上，其中尤以 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 的斜坡居多。在 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的斜坡上崩塌的数量较少，一则因为这样陡的斜坡本来就很少；二则因为在自然条件下，这样陡的斜坡是由结构比较完整的岩石组成的，稳定性很高，在地震时不易产生崩塌。

如果将斜坡的纵横断面分为直线形、凸形（下陡上缓）、凹形（下缓上陡）和复合形等四种形态的话，直线形的斜坡在地震时比较稳定，滑坡和崩塌很少发生。后三种形态的斜坡在地震时稳定性较差，其中尤以凹形斜坡上滑坡和崩塌发生的机率最高。其不稳定的原因，是因为这种斜坡多数系由老的滑坡和崩塌所形成的。

3. 地下水的影响

这里所讲的地下水系指震区通常地下水位埋深的影响。在河流冲积平原和滨海平原地区及黄土类土的复盖地区，当地下水位埋深小于6米时，尤其在 $0\sim 4$ 米之间，地震时会造成孔隙压力突然增加而引起砂土液化及由此而产生的地表滑移。如唐山地震时在震区的南部地下水位较高，天津杨柳青至香河县以东，丰南县和滦南县以南广大地区地下水埋深 $0\sim 2$ 米，松散砂层饱水，地震时造成大面积液化和喷水冒沙。在 10° 以上的斜坡上及河流两岸、路基、堤坝两侧造成大量的液化滑坡。

4. 气象条件的影响

发震时的气象条件，诸如连续长时间的降雨、特大暴雨、融冻等对地震时滑坡和崩塌的发生有明显的影 响。因为斜坡的稳定状况受降雨和融冻的影响而发生周期性的变化，在雨季或融冻季节

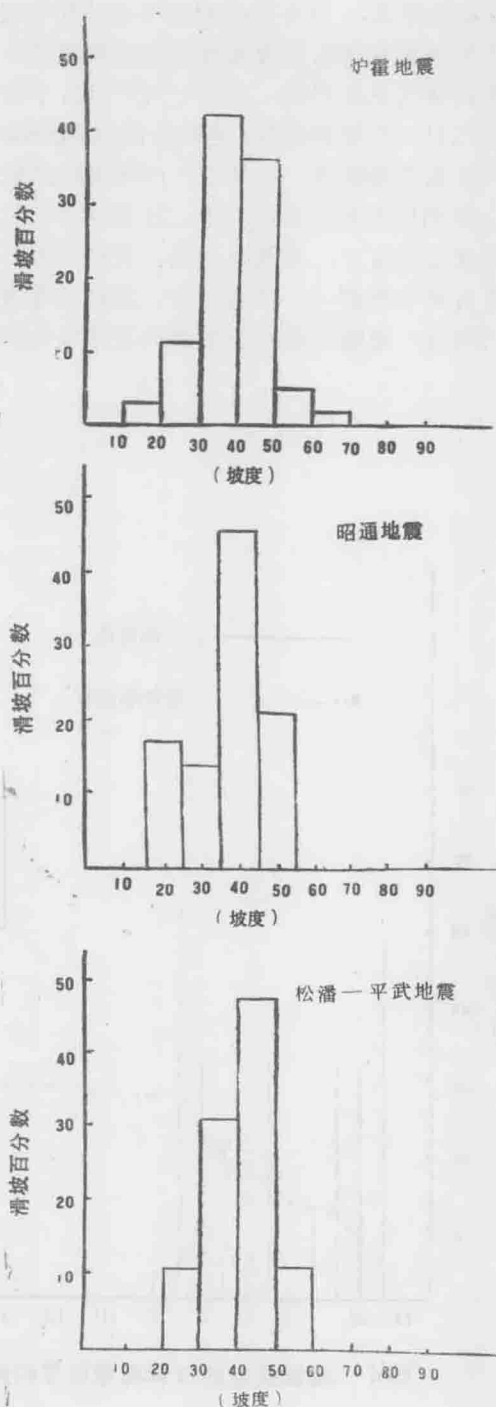


图3 地震滑坡和斜坡坡度的关系

斜坡的稳定性降低，而在旱季和冻结的时期斜坡的稳定性提高。显然对同一地区来讲，雨季发震应比旱季发震诱发的滑坡和崩塌的数量要多。

据平武县气象站资料，一九七六年八月十六日四川松潘——平武地震前，从七月二十八日至八月九日一个降雨过程，连续降雨286毫米，八月十六日地震时产生大量的滑坡和崩塌。八月十九日又开始降雨，八月二十日降雨53.7毫米，八月二十一日下午在崩塌和滑坡严重的沟谷里，开始出现泥石流。二十二日和二十三日地震时正值倾盆大雨，二十三日一日降雨量达70.6毫米（图4），地震时崩塌、滑坡和泥石流大量出现。对这次地震而言，连续的地震是诱发滑坡和崩塌的一个主要因素，震前和地震期间连续的暴雨也是重要的诱发因素。

综上所述，地震时滑坡和崩塌的发生是地震作用、震区的地质、地貌、降雨、地下水等

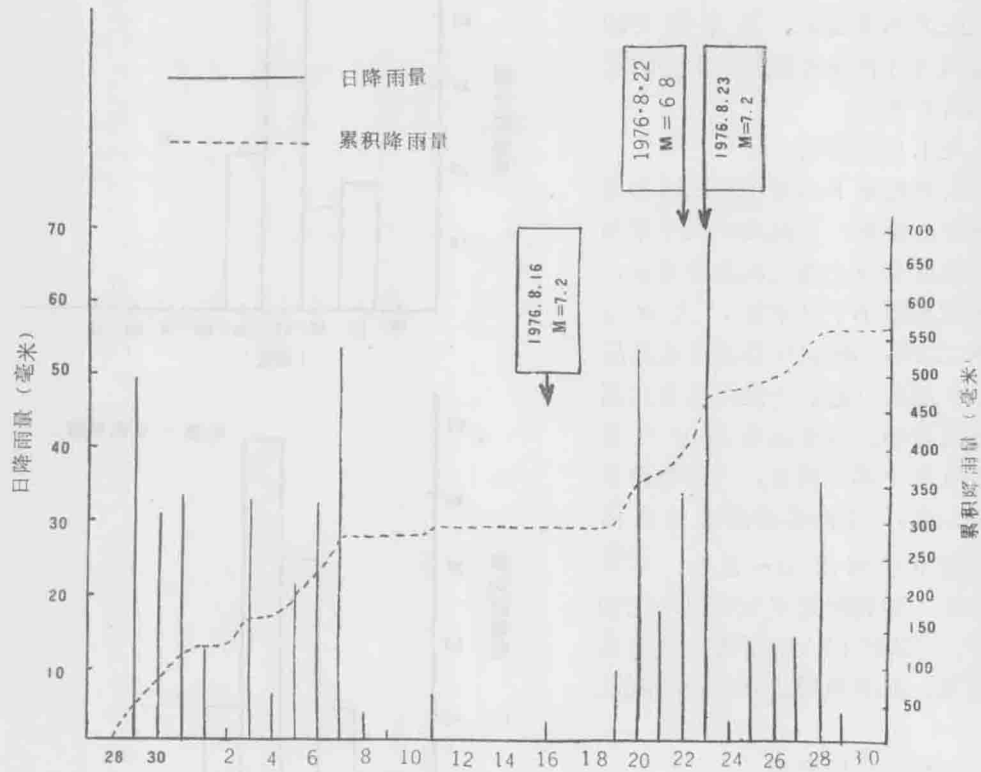
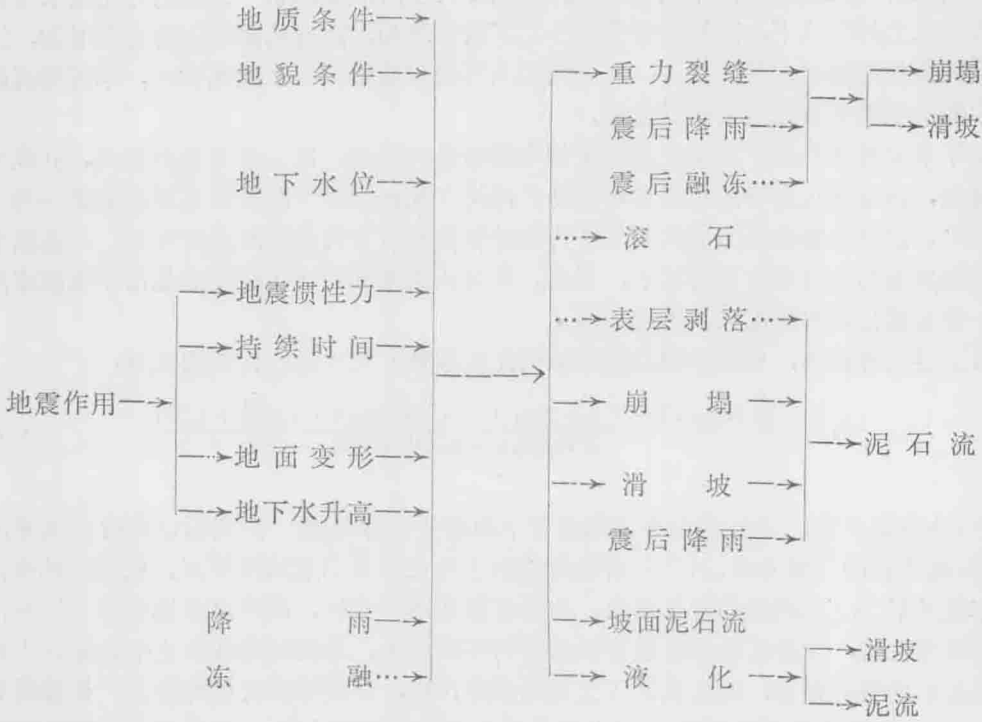


图4 地震前后的日降雨量和累积降雨量

各种环境因素总体综合作用的结果。地震时诱发的重力现象的类型及其相互的关系如图5所示。



注：虚线表示不太重要的因素或危害不大的重力现象

图5 地震滑坡和崩塌的影响因素及发展过程的图式

四、地震滑坡的机制

在强烈地震发生时，滑坡可以和地震同时发生，也可能由于斜坡土石松动开裂，地下水流路变化等，而使滑坡在震后很长一段时间才发生。前者我们称为同发型滑坡，后者称为后发型滑坡。

（一）同发型滑坡的机制

按照滑坡稳定性的一般分析，由滑坡的静力平衡条件，震前滑坡的稳定性系数（K）可用下式表示：

$$K = \frac{(\sum W \cos \alpha - u) \tan \phi + C \sum l}{\sum W \sin \alpha} \tag{1}$$

由于地震作用的影响，在地震惯性力作用下，使滑体下滑力增加、抗滑力减少以及引起土层中孔隙水压力增加等，从而导致滑坡稳定系数发生变化。

地震在旱季或在雨季刚开始时发生，除局部地方因受震沉应力场影响，在岩石膨胀和水