

## 强震区岩体地震动力破坏特征

梁庆国<sup>1</sup>, 韩文峰<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 天津城市建设学院土木工程系, 天津 300381)

**摘要:** 岩体的地震动力破坏是岩体动力学的重要组成部分, 但研究较少。本文分析了缺乏研究的原因; 将岩体地震动力破坏划分为 6 种形式即: 滑坡、崩塌、剥落、塌陷、地裂缝和岩体松动, 其中岩体松动是震后产生次生地质灾害的重要原因; 按照动力作用方式、岩体地震动力破坏的应力状态和破坏机制对岩体地震动力破坏进行分类, 并探讨了地震滑坡和非地震滑坡的区别; 讨论了岩体地震动力破坏的 5 个特点: 不均匀性、重复性、丛集性、结构控制性和广泛性。

**关键词:** 岩体力学; 强震区; 地震动力破坏; 岩体松动

**中图分类号:** TU457; P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2009)01-0015-06

### Characteristics of Rock Mass Failure under Seismic Loads at Strong Earthquake Areas

LIANG Qing-guo<sup>1</sup>, LIU Gui-ying<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 400041, China;

2. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** As an important part of rock mass dynamics, the seismic dynamic failure of rock mass was short of study before. In this paper, the reason of this short is analyzed first. The seismic dynamic failure of rock mass is classified into 6 types of forms: landslide, rock avalanche, spalling, collapse, ground fissure and rock mass dynam-relaxation, among them the rock mass dynam-relaxation is an important factor for causing a lot of secondary geological hazards. According to the action manner of seismic dynamic loads, stress state and failure mechanism, the rock mass seismic dynamic failure is further divided, the earthquake landslide and non-earthquake landslide are differentiated. At last, the characteristics of the failure are discussed from its inhomogeneity, repeated failure, clustering, controlling by discontinuities, and universality

**Key words:** Rock mass mechanics; Strong earthquake area; Seismic dynamic failure; Rock mass dynam-relaxation

## 0 引言

岩体不仅发育各种级序和规模的结构面, 且具有复杂的应力状态, 是最为复杂的介质之一。因其组分、结构和赋存环境条件的不同, 岩体跨越了似均匀连续的散粒体、非连续和不均匀弱面体和完整均匀连续体这一复杂序列, 其力学响应表现出高度的非线性(匀变和灾变的交替演化)和不确定性(随机性、模糊性和未确知性)。大量的试验资料表明, 岩

体的动力特性和静力特性有较大差异。在工程岩体爆破、地下核爆等方面已开展了岩体动力学方面的研究<sup>[1-2]</sup>, 但有关强震区岩体动力破坏方面的研究却较少。山崩(亦称基岩崩塌)、滑坡和岩体倾倒变形等都是强震区常见的岩体破坏现象, 是造成严重的直接灾害及震后次生灾害的重要原因, 这在地震文献资料中有大量的描述<sup>[3-6]</sup>, 特别是关于地震崩塌、

收稿日期: 2008-05-13

基金项目: 兰州交通大学“青蓝工程”资助项目, 科技部社会公益研究专项(2002DIB20062)

作者简介: 梁庆国(1976—), 男(汉族), 甘肃临洮人, 博士, 副教授, 现主要从事岩土工程和工程地质方面的教学和研究工作。

滑坡等方面的研究最为丰富和深入,积累了较多的成果<sup>[7-13]</sup>。但当地震方面的资料中缺乏有关强震区岩体动力破坏特征、分类、成因机制等方面的研究。而探讨地震动力作用下岩体的动力变形、破坏的形式、分类和特征,不仅具有较强的理论意义,并且对工程抗震设计、防灾减灾等也具有重要的现实意义。

### 1 岩体地震动力破坏缺乏研究的原因

岩体地震动力破坏问题缺乏研究的主要原因有:(1)地震具有典型的复杂性、不可预知性和不可抗拒性;岩体又是最为复杂的介质之一,岩体的地震动力破坏涉及地形地貌、岩土结构、地下水等多方面的因素,具多样性和随机性,因此对该问题的研究难度较大。(2)地震造成的岩体破坏范围大,与工程爆破和核爆相比,地质条件和水文条件的特征难以判断,岩体动力破坏范围和程度具有较大的不确定性。(3)岩体地震动力破坏多发生在基岩山区,人烟稀少,交通不便,震后考察难度大,理论意义重要但应用价值似乎不大。即便进行考察研究,也仅仅作为

评定地震烈度的参考依据,鲜有关于岩体动力破坏的专题研究。(4)对地震动力破坏岩体的认识和防治尚缺乏经验,特别是由于岩体常常为表层第四纪沉积物覆盖,难以区分动力效应破坏和静力效应作用的结果,增加了判断和认识的难度。(5)客观上对地震动力造成岩体大范围破坏的测试方法还不多,缺乏必要的基础数据,导致对该问题的研究仅仅停留在定性认识的阶段,难以进行量化分析和评价。

### 2 岩体地震动力破坏的形式和分类

#### 2.1 岩体地震动力破坏的形式

通过查阅相关地震调研资料,结合对 1556 年陕西华县地震、1879 年甘肃文县地震、1931 年新疆富蕴地震等强震区岩体地震动力破坏的现场考察,将极震区岩体地震动力破坏分为如下 6 个主要形式:滑坡、崩塌、剥落<sup>[19]</sup>、塌陷、地裂缝和岩体松动,图 1 是 1976 年龙陵地震震害类型分布,其中的剥落和崩塌尤为典型。

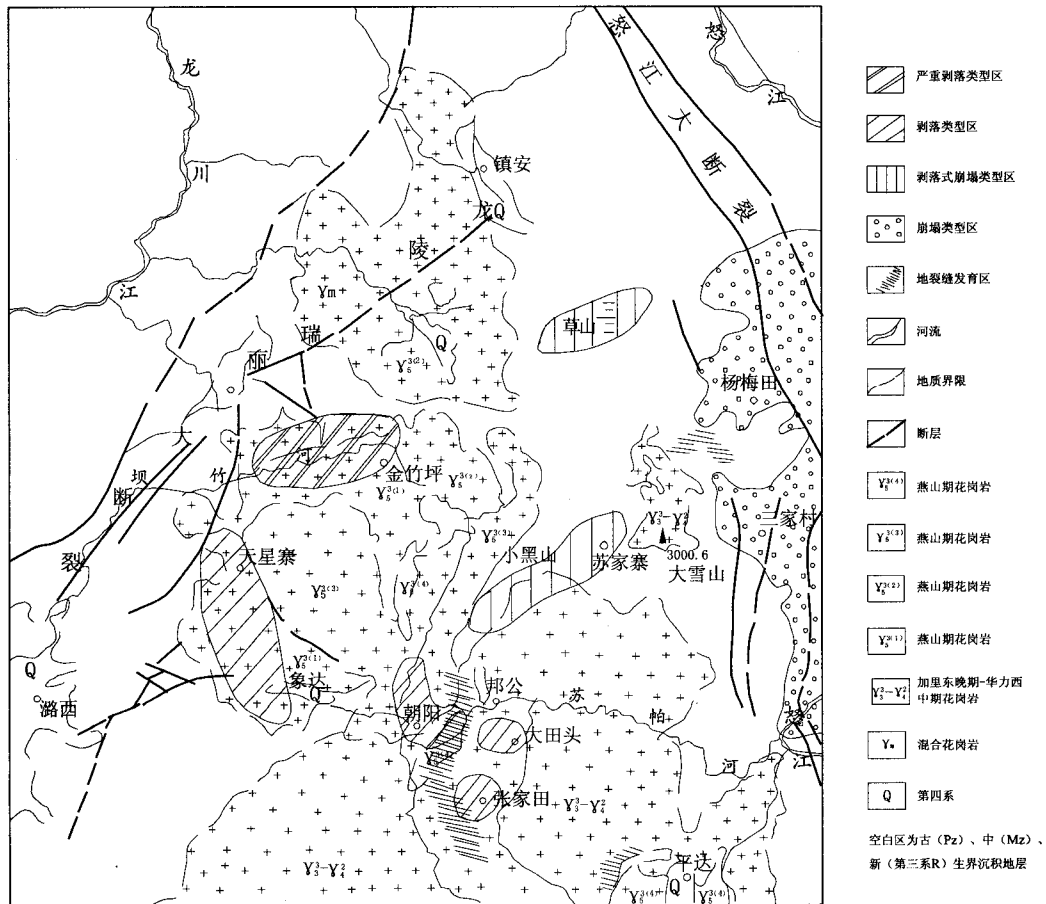


图 1 1976 年龙陵地震震害类型分布图(据文献[19])

Fig. 1 Distribution of seismic hazards after Longling Earthquake in 1976, Yunnan(from Chen etc,[19]).

岩体松动是指在地震动力作用下,岩体发生了应力释放、结构面张开、密度及其完整性的显著下降<sup>[14]</sup>,但未产生如其它破坏形式那样显著的宏观特征,是一种岩体隐性的、内在的损伤,是产生震后次生灾害的主要原因<sup>[5-6,16-17]</sup>,如 1974 年 5 月 11 日云南昭通地震发生后两个月,即 1974 年 7 月 8 日,昭通震区西南距老寨堡南 1 km 处,发生一次巨大的崩塌。崩塌前一天为阴雨天气,曾在老寨堡附近大槽村一带发生 2.6 级的一次小余震。震后 5 分之即发生了崩塌。新、老崩塌体一起往下滑动,流入低洼沟谷。整个崩塌体呈长舌状,自东南向西北方向延

伸,宽约 150~200 m,长约 1.5 km。崩塌体自上而下可分为崩塌、滑坡和泥石流三段,其中尤以泥石流分布距离最长。崩塌堆积物主要为未经分选的杂乱块石,大小一般为 1~125 m<sup>3</sup>,最大可达 1 000 m<sup>3</sup><sup>[16]</sup>。

大量实际资料表明,地震发生时上述的形式可能都会出现,都表现为上述单指标破坏形式的组合或复合,产生的岩体破坏现象和形式较为复杂。地震滑坡是研究较多的岩体地震动力破坏形式之一,表 1 给出了关于地震滑坡和非地震滑坡的比较。

表 1 地震滑坡与非地震滑坡的比较(据文献[15],有修改)

类型	地震滑坡	非地震滑坡
前兆	不明显,历史上遭受地震滑坡的地区,下次容易再遭到破坏	明显,从土体内裂缝逐渐扩大,临滑前土体内部压力剧增,会发出声响,并能观察到土体蠕变现象
扰动方式	能量扰动为主(地震波);破坏能量来自"外部"动荷载和自重应力及构造应力的耦合作用	主要扰动方式为物质成分(降雨、加卸载等);改变破坏能量来自滑体自重应力的改变和强度的降低
动力来源与环境	地震波传播过程中产生的惯性力作用、砂土液化和强度降低原因等造成破坏;	以岩土体自重为主,可能还有水渗入等触发因素;主要原因是强度降低;
变形破坏发展过程	地震荷载的作用使得岩土体强度和稳定性在较短时间内迅速改变,变形和破坏发展的时间短,具突然性,属岩土体被动调整和平衡的过程	有一定的变化发展周期,属于岩土体自重应力的自动调整和平衡过程,最终因突破其强度极限而破坏
地形原始坡度	地形地貌因素并非主要控制因素,可能是比较平缓的地形,甚至在小于五度地形坡度区也会产生滑移破坏	地形地貌因素较为关键,一般均在高陡边坡区发生,很少见有在低缓坡角处大面积发生滑坡现象
分布特点	往往面积大,同一时间内成群地出现,尤其在高烈度区。离震中区近,滑坡数量增多,离震中区远,滑坡数量相对减小;也有不均匀性特点	很少在同一瞬间出现大面积的滑坡群,滑坡体往往是单个地出现
岩土体破坏特点	两侧同时破坏的特点;破坏形式复杂多样 地震荷载从地下深部向地表传播,在平面和深度方向上的变化规律较复杂,破坏范围大、程度高	以单侧破坏为主;破坏形式相对单一 破坏自地表开始,向深部逐渐减弱,具一定的渐变性和规律性,破坏范围和程度有限。
有关堰塞湖	成群堵塞河道,在大面积范围之内可形成串珠状湖泊群,湖与湖之间高差不一	大型滑坡体也能形成堰塞湖,但总的看来,规模小,形不成串珠状

## 2.2 岩体地震动力破坏的分类

### 2.2.1 按作用力分类

造成强震区岩体破坏的地震力是作用时间短、强度大的惯性力,表现出很强的随机性,即地震力作用于岩体的过程中,不但力的大小发生交替变化,而且力的方向亦非固定不变。按力源特征强震区岩体破坏可分成 3 大类:(1)地震力造成的岩体破坏(亦称构造破坏);(2)地震力触发的已处于静力(重力)临界状态的岩体破坏;(3)地震力和静力联合作用造成的岩体破坏。地震动力造成的岩体破坏特征与静力造成的岩体破坏存在差异,力的作用过程不同是造成这种差异的根本原因,特别是加载频率、加载方向变化及震动持续时间等因素的影响。

### 2.2.2 按破坏前的静力状态<sup>[18]</sup>分类

一般地,岩体从地表到深部具有不同的静应力状态和分布特征,依次分别是表层松动带,应力集中

带和原岩应力带。以山体失稳破坏前的静态应力和变形状态划分,可将地震动力造成岩体破坏的类型划分为:(1)沿山坡松动带以下原岩中某些结构面滑动造成的破坏;(2)沿松动带界面发生的边坡破坏;(3)在山坡松动带内发生的坡面失稳破坏。

### 2.3.3 按破坏机制的分类

已有的研究表明:不同的岩体介质类型对应着不同的变形、破坏机制,其中岩体的结构面对整个岩体的变形破坏起控制作用。若单从岩体地震动力破坏的荷载角度或失稳机理来看,则可以分为 3 大类:(1)由于过大的拉应力引起的散裂、崩塌和剥落,如 1976 年龙陵地震中大范围的地表剥落现象<sup>[19]</sup>;(2)由于累积的滑动变形引起大位移而导致斜坡破坏,大多数地震滑坡当属此类;(3)岩体中含水土层的液化及地下水动力作用引起的破坏<sup>[20]</sup>。

## 3 岩体地震动力破坏的特征

大量的震害资料表明,强震区内的岩体变形破坏是强烈地震动力作用的结果,强震区内的岩体地震动力破坏的具有如下特点。

### 3.1 不均匀性

强震区岩体动力破坏的程度、类型和分布范围与其地震震级大小大致正相关。一般地,震级越大,烈度越高,所产生的岩体破坏及地质灾害也越严重。统计资料表明,震级6级或烈度达Ⅶ度以上地震就有岩体破坏发生。但是也有例外,如1982年3月陕西秦岭区曾发生过一次4.5级地震,使得近1000 m长的范围出现了大量基岩崩塌、裂缝<sup>[21]</sup>。国外也有小地震引发大规模滑坡等灾害的例子,许多震例中均有破坏严重地区出现破坏相对较轻的“烈度异常区”,这说明强震区内岩体的动力破坏具有不均匀性特点。这种不均匀性是岩体本身介质和力学属性的不均匀性、地震荷载的不均匀性及局部地形地貌的不均匀性等综合因素共同作用的结果。相比于静力荷载造成的破坏,地震动荷载的不均匀性尤为典型。

### 3.2 重复性

地震是地壳岩层中的地应力超过岩体强度发生破裂而产生的,由于地层中的地应力始终处于“集中—释放—再集中—再释放…”等这样一个永不停止的动态变化过程中,地震活动具有重复性发生的特点,一定区域内的岩体也将受到多次地震动力的重复破坏。如昌马断裂带附近的地震滑坡是该断裂带多次古地震和历史地震造成的<sup>[9]</sup>。又如1974年昭通地震时元亨、马家坪崩塌就覆盖于巨大的老崩塌体上,且老崩塌体的范围远大于该次地震产生的新崩塌体<sup>[16]</sup>。

### 3.3 丛集性

大地震的强震区范围可达数百平方公里,而岩体的地震动力破坏具有丛集性特点是较为普遍的现象。如1920年海原地震<sup>[24]</sup>、1927年甘肃古浪地震、1931年新疆富蕴地震、1950年西藏墨脱地震<sup>[4]</sup>、1976年龙陵地震<sup>[19]</sup>、1999年台湾集集地震<sup>[23]</sup>等。较为典型的是1933年四川叠溪地震时,在沿岷江支流的松平沟内因基岩顺层崩塌,多处峡谷地段堵塞河道,形成6个串珠状“地震海子”——地震堰塞湖,并形成大量的基岩崩塌体和倒石堆(图2)<sup>[25]</sup>。这说明,强震造成的岩体破坏具有明显的丛集性特点。岩体地震动力破坏产生的崩塌、滑坡、地裂缝等分布受极震区形状和范围的影响,其分布发育的密度和规模受断裂活动强度控制。从强震区向外随着烈度的降低,无论其规模、数量和发育密度都具有

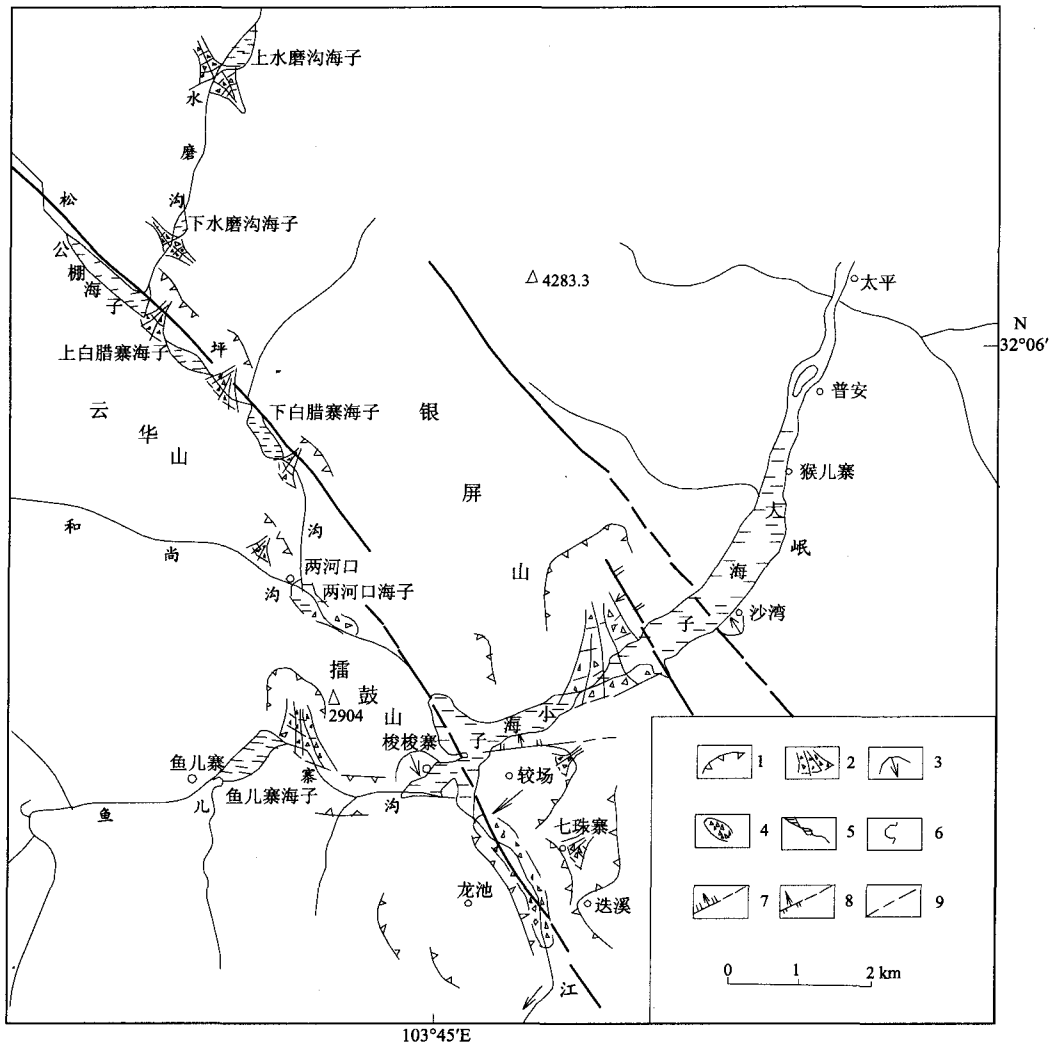
随之减小的特征,也说明强震区内的强烈地震动力作用是产生岩体破坏的主要荷载。

### 3.4 结构控制性

从岩体结构破坏的角度,还可将极震区岩体的动力破坏分为大的两类,即岩体结构的宏观显性破坏和微观隐性破坏。前者表现为具有显著破坏特征的大变形、大位移等破坏形式,如崩塌、滑坡、塌陷、剥落等,因控制性结构面的失稳引起,是岩体松动达到一定程度上的质变,具有突变性,如2008年汶川大地震时宝成铁路109隧道岩体崩塌(图3);而后者则主要是岩体的松动,如结构面的增长、贯通和张裂,岩块的错动、旋转等,是非控制性结构面的发展,使岩体中的地应力释放,结构疏松,导致其连续性和完整性进一步破坏,强度降低,促进了岩体的风化作用,属于岩体的一种累加性破坏,具有渐进性,如1931年新疆富蕴地震极震区岩体松动(图4)。岩体结构对强震区岩体地震动力破坏在不同的结构层次上均具有控制性作用。因此,岩体地震动力破坏研究重点,一是查明其控制性结构面的分布特征并就其稳定性进行预测和评价;二是划分岩体松动的范围和程度。

### 3.5 广泛性

大量的历史震害记录和现代地震研究资料说明,地震作用造成岩体的破坏范围大,特别是如前所述的岩体松动,作为一种更为较为普遍的破坏形式和现象,是客观存在并成为许多地质灾害的主要原因之一<sup>[5-6,17]</sup>,极易为崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害提供了丰富的物源和水源,使多种山地灾害复合叠加,形成了地震—崩塌—滑坡—泥石流灾害链、暴雨山洪—崩塌滑坡—泥石流灾害链、冰雪暴融—崩塌滑坡—冰川泥石流灾害链等。1950年西藏察隅8.5级大地震之后,藏东南山区进入山地灾害活跃期,大规模冰崩、雪崩、冰湖溃决、冰川泥石流、山崩、滑坡等灾害接踵而至;20世纪70年代云南龙陵、四川松潘—平武等大地震,加剧当地的山地灾害,尤其是对滑坡的影响;云南小江流域近300年来之所以成为我国山地灾害的高发区,正是每100年发生一次的6级以上大地震及其对地表的破坏作用所致<sup>[6]</sup>。甘肃陇南地区频繁发育的滑坡、泥石流,距今仅120多年的1879年文县8级地震起了控制性的作用<sup>[17]</sup>。我国一些著名的强震带,大都是山地灾害的主要发育地带<sup>[6]</sup>。由此可见,地震作用对岩体的松动是极为普遍的破坏形式和现象,并且这种松动、损伤的广度和深度要大于一般静态营力(如风化、卸



1. 震后跨方陡壁; 2. 倒石堆; 3. 滑坡和滑动方向; 4. 堰塞湖残坝; 5. 堰塞湖; 6. 溶洞; 7. 正断层; 8. 逆断层; 9. 性质不明断层

图 2 1933 年四川迭溪地震后自然破坏情况及主要断裂构造位置分布图<sup>[26]</sup>

Fig. 2 Distribution of seismic failures and main ruptures after Diexi Earthquake in 1933, Sichuan.



图 3 2008 年四川汶川地震时宝成铁路 109 隧道岩体崩塌

Fig. 3 Rock mass avalanche at No. 109 Tunnel on Baocheng Railway, Wenchuan Earthquake in 2008, Sichuan.



图 4 1931 年新疆富蕴地震极震区 岩体松动破坏

Fig. 4 Rock mass dynam-relaxation at meizoseismic area of Fuyun Earthquake in 1931, Xijiang.

荷等)作用的结果。在我国实施西部大开发战略的过程中,西部广大的高烈度地震区进行基础设施建设时必将面临地震动力破坏的松动岩体所带来的诸多问题。因此广泛收集强震区的岩体破坏资料,采用多种技术方法和手段,分析、预测地震动力破坏岩体的工程性质是工程建设顺利进行的保证。

#### 4 结论

岩体地震动力破坏是理论和现实意义重大,但研究较少的课题,其主要原因在于研究的复杂性和现场调研的困难。本文初步探讨了岩体地震动力破坏的相关问题,取得了如下认识:

(1) 岩体的地震动力破坏形式可以分为滑坡、崩塌、剥落、塌陷、地裂缝和岩体松动。地震时,上述形式可能都会出现,且大多是组合或复合破坏形式,形式较为复杂。

(2) 地震动力造成岩体松动是一种普遍和广泛的破坏形式,特征不如其它形式的破坏显著,但提供了震后次生灾害的物质基础,是产生震后次生灾害的重要原因。

(3) 依据破坏力、破坏前应力和位移状态以及破坏机理,岩体地震动力破坏可划分不同的类型。类型划分有利于更好地理解岩体地震动力破坏的原因、特征和影响因素。

(4) 岩体地震动力破坏具有不均匀性、丛集性、重复性、结构控制性和广泛性等特点。不同特征的结构面是控制岩体动力破坏的主要因素。查明控制性结构面特征和岩体松动范围及程度是岩体地震动力破坏研究的重点。

#### [参考文献]

- [1] 黄理兴,陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1881-1886.
- [2] 陈剑杰,钱七虎. 与地下核爆炸有关的若干岩石力学问题[A]//中国岩石力学与工程学会第六次学术大会论文集[C]. 北京:中国科学技术出版社,2000,10:48-51.
- [3] 郭增建,马宗晋. 中国特大地震研究(一)[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [4] 楼宝棠,主编. 中国古今地震灾情总汇[M]. 北京:地震出版社,1996.
- [5] 陈永明,刘洪春. 古浪大震的地质灾害及破坏特征[J]. 西北地震学报,1999,21(3):315-320.
- [6] 杜榕桓,朱笔. 山地灾害发展趋势预测[A]//丁一汇,主编. 中国西部环境演变评估—中国西部环境变化的预测(第二卷)

- [G]. 北京:科学出版社,2002:140-165.
- [7] 乔建平,蒲晓红. 川滇地震滑坡分布规律探讨[J]. 地震研究,1992,15(4):411~417.
- [8] Zhou Beng-gang, Zhang Yu-ming. Some characteristics of earthquake induced landslide in southwestern China [J]. Northwestern Seismological Journal,1994,16(1):95-103.
- [9] 康来迅,邹谨敏,蒋荣发. 昌马断裂带地震滑坡的基本特征[J]. 华南地震,1995,15(1):49-54.
- [10] 孙崇绍,蔡红卫. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及其分布特征[J]. 自然灾害学报,1997,6(1):25-30.
- [11] 孙崇绍. 特大地震的震害特征[J]. 西北地震学报,1993,15(2):64-70.
- [12] C E Rodriguez, J J Bommer, R J Chandler. Earthquake-induced landslides: 1980-1997[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,1999(18):325-346.
- [13] David K Keefer. Investigating landslides caused by earthquakes—A historical review [J]. Surveys in Geophysics 2002,23:473-510.
- [14] 韩文峰. 黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993.
- [15] 《中国岩石圈动力学地图集》编委会. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京:地震出版社,1991.
- [16] 朱海之,王克鲁,赵其强. 从昭通地震破坏看山区地面破坏特点[J]. 地质科学,1975,8(3):230-241.
- [17] 唐永仪. 新构造运动在陇南滑坡泥石流形成中的作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1992,23(4):152-160.
- [18] 马惠民,郑静. 岩体结构特征与岩石高边坡的稳定性[A]//滑坡文集编委会主编. 滑坡文集(十二)[G]. 北京:中国铁道出版社,1997:125-132.
- [19] 陈立德,赵维城,阚荣举,等. 一九七六年龙陵地震[M]. 北京:地震出版社,1979.
- [20] 康普堡海海岸坡地震稳定性研究:冶金工业部建筑研究院[A]//中国科学技术情报研究所,编. 地基的地震效应和砂土液化译文集[G]. 北京:科学技术文献出版社,1977:68-76.
- [21] 《中国地震科技文献题录大全》编纂组,编. 中国地震科技文献题录大全[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [22] S N Ayonghe, G T MAFANY, E NTASIN, etc. Seismically activated swarm of landslides, tension cracks, and a rockfall after heavy rainfall in Bafaka, Cameroon[J]. Natural Hazards, 1999,19:13-27.
- [23] Jian-Hong Wu, Wen-Neng Wang, Chuang-Sheng Chang. Effects of strength properties of discontinuities on the unstable lower slope in the Chiu-fen-erh-shan landslide, Taiwan [J]. Engineering Geology,2005(78):173-186.
- [24] 卢育霞. 宁夏西吉县境内地震滑坡的地貌特征及其减灾开发对策探讨[J]. 西北地震学报,2007,29(1):79-83.
- [25] 国家地震局西南烈度队. 川滇强震区地质调查汇编[M]. 北京:地震出版社,1979.