

强震区人工岩质路堑边坡的破坏 及稳定性评价

许 国 昌

(陕西省地震局)

摘 要

山区道路沿线的人工边坡很多。强震时, 这些边坡经常会出现严重的破坏, 除直接造成的损失而外, 还会断绝交通给防震、抗震救灾带来极大的困难。本文通过云南通海、昭通、辽宁海城等地震区、公路和铁路的人工岩质路堑边坡的宏观震害资料, 试图对此类边坡的抗地震稳定性及其受震破坏的规律性进行分析以探求震区岩质边坡稳定条件, 为设计此类的边坡提供必要的依据。

一、震 害 类 型

在云南通海、昭通和辽宁海城三个地震区共调查了人工岩质路堑边坡105处, 分布在7°—10°四个烈度区。详见表一。

岩质路堑边坡宏观调查统计表

表一

地 震 区	震 级	震中烈度	调 查 点 的 分 布		
			线 路	烈 度	数 量
云 南 通 海 1970.1.5	7.8	10° +	晋(宁)一元(阳)公路线	8°—10°	28
			昆(明)一(打)洛公路线	8°	8
			易(门)一峨(山)公路线	8°	2
			蒙(自)一宝(秀)米轨铁路线	7°	1
云 南 昭 通 1974.5.11	7.1	9°	小(堡子)一绥(江)公路线	7°—9°	28
辽 宁 海 城 1975.2.4	7.3	9° +	长(春)一大(连)铁路线	9°	1
			海城镁矿铁路专线	9°	2
			大石桥镁矿铁路专线	8°—9°	7
			海城一新开岭公路线	7°—8°	10
			露天采场	9°	18

岩质路堑边坡的震害类型有:

1. 崩塌 是高烈度区(9° 以上)人工岩质路堑边坡十分普遍且规模巨大的震害现象,在低烈度区(8° 以下)崩塌数量既少,规模也小。一般说来,节理裂隙发育、构造破碎的坚硬岩层或软硬相间岩层构成的高陡边坡是易产生崩塌的地带。因此,崩塌总是与强烈的侵蚀切割、断裂破碎带的发育等密切相关。如通海地震的极震区,晋元线K112—K117段沿曲江右岸半山腰以挖方通过,自然山坡坡度为 40° ,高约200余米。线路正处于曲江断裂破碎带上,堑坡均为破碎的昆阳群板岩,路堑边坡系爆破施工挖成,原堑坡高度仅5—6米。地震时严重崩塌,形成连绵三公里长的岩屑堆裙,堑坡以上的坡积层受牵引滑动,土方量最大可达百余万立方米,交通中断。类似现象在昭通地震时也曾出现。

在低烈度区,当岩体破碎且有软弱面倾向路基时,高陡的堑坡也是值得注意的,如广东阳江地震时, 6° 区的良东线K10+800—K10+900段,花岗岩堑坡就曾发生崩塌断道现象。

2. 滑坡 破碎岩体在地震力触动下,沿倾向路基的结构面整体向下滑移形成滑坡,滑坡床多为较完整的透水性弱的岩体。滑坡是 9° 以上地震区内屡见不鲜的边坡破坏现象, 8° 以下则较少。滑坡的危害十分严重,如小绥线K114老虎口滑坡就是昭通地震极震区中最大且典型的滑坡。该线沿阴河右岸通过,自然山坡较陡,由破碎风化的玄武岩构成,滑坡体沿 $N30^\circ E/\angle 40^\circ SE$ 、 $NS/\angle 70^\circ W$ 两组结构面滑移,把一段傍山公路整体旋转推至阴河对岸,路面直立高出原路面20余米,土方量达48万立方米,堵塞阴河、聚水成湖,

3. 错落 常发生在软弱结构面发育且陡直的地带上,以软质岩内居多。边坡岩体沿错落面整体竖向下滑为此类破坏的特征。地下水的增重和软化起着积极的作用,所以在昭通震区七—八度区内小绥线沿线屡见这种现象。

4. 坠落 常发生在坡面不平正、坡顶风化较重或有倾向路基结构面的高陡边坡地带,坠落实质上为小型的崩塌,是震区中很常见的现象。坠落体大者数立方米,小者似碎块石,对交通有一定危害。

5. 裂缝 有两种:①构造裂缝,常发生在发震断裂带或成因上有密切联系的断层带穿过的边坡地带,以鲜明的方向性为特征。在通海 9° — 10° 区内均有出现,在1975年四川炉霍地震区的川藏公路上更是屡见不鲜。在一定条件下,此种裂缝也会诱发边坡破坏。②地震—重力裂缝,是地震力和重力联合作用产生的弧形张性裂缝,没有方向性。此种裂缝是震区中常见的现象,往往给边坡造成震后隐患。

当然,就是在高烈度区内,各种类型的路堑边坡均有完好无恙者,这为地震区岩质边坡的稳定性评价提供了极为宝贵的依据。如通海晋元线K113+700,路基位于曲江右岸突出山咀处,是曲江断裂带上局部岩体完整的厚层钙质板岩边坡,坡角 75° — 85° ,坡高25米,经受住十度地震的考验且完好无损。

综上所述,在强地震作用下,按边坡变形破坏及对线路的危害程度,可将三个地震区宏观调查的堑坡震害分为三大类:

完好边坡 调查有57处。

基本完好边坡 包括坠落、开裂、松动等局部破坏,从边坡整体看,并未遭破坏。有32处。

遭破坏边坡 包括滑坡、崩塌、错落等,这些震害现象往往阻车、断道,甚至引起次生灾害(砸毁、掩埋或淹没线路工程和房屋等),对线路危害很大。有16处。

二、影响人工岩质路堑边坡抗地震稳定性因素的分析

1. 岩体结构 岩质路堑边坡是由岩体构成的, 岩体被不同成因的连续或不连续界面所划分。从工程地质观点若把岩体作为结构看待, 则这些地质界面可统称为结构面, 受这些结构面切割的岩块或块体称为结构体。所谓岩体结构, 就是结构面与结构体以不同形式的相互组合, 其特性视结构面与结构体的特性及组合特点来决定。岩体的完整性与结构面发育的规模和密度有关, 它反映了结构体的块度和形态。岩体的强度受结构面控制, 且主要取决于软弱面的抗剪强度及空间分布状态。岩质边坡的稳定性与组成边坡岩体的结构, 完整性及岩体的强度有密切的关系。所以, 综合考虑边坡岩体的物理力学性质、结构面的规模、密度及充填物特性后, 可将人工岩质边坡划分为五种类型——块状结构、镶嵌结构、碎裂结构、薄层状结构及层状碎裂结构。各类型边坡岩体结构的性质、特征及结构面发育程度等, 详见表二。岩体结构是组成边坡岩体整体性及其强度的反应, 所以, 地震条件下, 稳定边坡的高度是由岩体结构和边坡的外形来决定的。由震害关系图1Ⅱ—a、Ⅲ—a、Ⅴ—a可知, 当坡度为60°时, 镶嵌结构边坡在九—十度震区内, 无震害边坡高度为21米; 碎裂结构为15米; 层状碎裂结构的安全高度则极低, 需特别注意进行稳定性分析。可见岩体结构对边坡的影响相当显著。从地震破坏现象看, 一般块状结构边坡稳定性好, 抗震能力强; 高陡的镶嵌结构边坡坠落现象增多; 碎裂结构边坡则易出现崩塌、滑坡等整体性的震害现象; 层状碎裂结构边坡的整体性破坏十分突出, 接近于散体结构。

边坡岩体结构类型及其特性

表二

岩体结构类型	边坡岩石性质及结构体形式	结构面的发育程度	边坡调查情况				工程地震地质评价
			总数	完好	基本完好	破坏	
块状结构	厚层灰岩、白云岩、板岩及玄武岩, 结构体一般呈块状、柱状或厚层状。	主要结构面有二组, 间距在50—100厘米以上, 闭合状, 无泥质充填物。结构面间结合较强, 风化轻微。	9	2/6	1/		岩体整体强度高, 所以, 在高烈度区此类边坡是稳定的, 仅有轻微震害现象, 一般不需采取抗震措施。
镶嵌结构	厚层砂岩、白云岩、灰岩、板岩及玄武岩, 结构体一般呈菱形或锥形。	主要结构面在三组以上, 间距在20—50厘米, 闭合状, 很少有充填物, 结构面间有一定结合, 风化中等。	31	9/13	4/5		岩体在整体上强度较高, 但连续性较差, 在高烈度区(九—十度)内, 边坡过陡时易产生坡顶坠落, 甚至出现崩塌, 但规模不会大。对高陡边坡的坡顶需采取措施。
碎裂结构	砂岩、白云岩、灰岩、板岩、花岗岩等, 岩体支离破碎, 一般呈碎块状。	主要结构面在四组以上, 间距小于20—30厘米, 结构面间轻微裂开, 并有一些充填物, 结构面结合较差。	31	6/4	6/9	5/1	岩体整体性破坏较大, 强度显著降低, 在低烈度区(七—八度), 边坡过于高陡时, 会出现坠落, 甚至崩滑现象, 应予以重视。
薄层状结构	千枚岩、板岩、片岩、白云岩及凝灰岩等, 结构体一般呈薄板状。	结构面一般为二至三组, 但以层理、片理最为显著, 间距小于30厘米, 风化中等。	9	4/5			岩体强度介于镶嵌结构与碎裂结构间, 边坡的稳定性受结构面控制。
层状碎裂结构	砂页岩、薄层板岩, 片岩、粉砂岩夹泥岩、薄层白云岩等, 结构体呈软硬相间状或薄板状碎块。	结构面在三至四组以上, 结构面间距一般在30—40厘米以下, 多有充填物, 风化较重。	25	5/4	6/1	/9	岩体整体性破坏较大, 强度很低, 软弱面发育, 地下水作用明显, 低烈度区易坠, 高烈度区易滑, 且规模大, 危害严重, 需加强防震防滑措施。

注: 5/4线上指7°—8°区, 线下指9°—10°区。

2. 结构面与人工边坡的空间组合 岩体结构对边坡岩体的变形破坏而言是最基本的因素

对具体的人工边坡来说, 岩体的结构面与边坡(方位、坡度及自然山坡坡度等)的空间组合关系, 对边坡的稳定、变形破坏的机理也同样至关重要。为此, 运用赤平极射投影的方法对边坡岩体结构进行稳定性分析, 从它们的空间组合关系出发, 对边坡又可进一步分为稳定结构、基本稳定结构和不稳定结构三种类型:

稳定结构 结构面倾向或结构面组合交线的倾向与边坡倾向相反。如图2—1所示。

基本稳定结构 结构面倾向或结构面组合交线的倾向虽与边坡倾向相同, 但前者的倾角都大于后者。如图2—2所示。这种结构的稳定性一般说来略逊于前者。

不稳定结构 结构面或组合交线的倾向与边坡倾向一致, 而前者又都小于后者的倾角。如图2—3所示。其稳定性最差, 易沿结构面滑动。

为搞清地震条件下人工岩质边坡产生变形破坏的原因, 对边坡的震害类型进行了统计。结果见表三, 由表三可知: 强震下, 稳定结构边坡一般震害很少; 基本稳定结构边坡仅见到局布的破坏, 一般以坡顶坠落为主; 不稳定结构边坡在强震下反应灵敏, 破坏较重, 尤其是碎裂或层状碎裂结构边坡最易产生崩塌和滑坡。

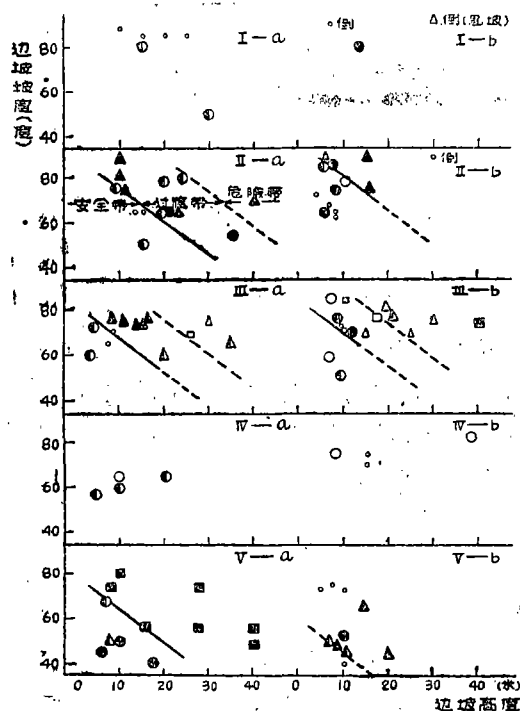


图1 边坡岩体结构与震害关系图

I、II、III、IV、V 分别指块状结构, 镶嵌, 碎裂, 薄层状, 层状碎裂结构
a、b 分别指 $9^{\circ}-10^{\circ}$ 、 $7^{\circ}-8^{\circ}$ 地震区

结构类型	震害	崩、滑、坠、裂	完好
不稳定结构	■	▲	●
基本稳定结构	▣	△	⊙
稳定结构	□	△	○
未作分析者	■	■	■

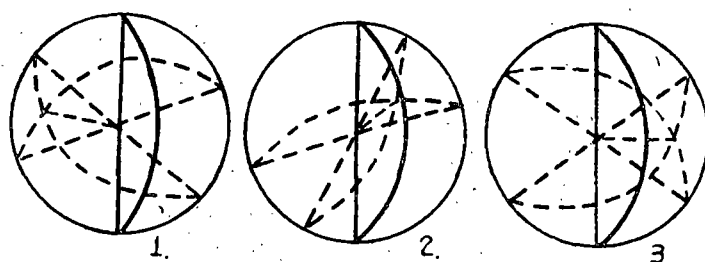


图2 岩体结构稳定性分析示意图

实线弧—边坡坡面

虚线弧—结构面

有震害边坡结构稳定性分析表

表三

岩体结构类型	调查数	不稳定结构				基本稳定结构				稳定结构			
		坠 落		崩、滑		坠 落		崩、滑		坠 落		崩、滑	
		9°—10°	7°—8°	9°—10°	7°—8°	9°—10°	7°—8°	9°—10°	7°—8°	9°—10°	7°—8°	9°—10°	7°—8°
I	7	4	2			1							
II	12	5			8	2	1				1		
V	15		8	8		1	2					1	

注：包括缺少原始边坡数据（已破坏），却进行了稳定性分析的边坡。

图1说明，各类岩体结构的边坡似乎存在着一个破坏下限和上限所夹的过渡带。在这个带以下的不稳定结构边坡一般也没有震害；在这个带以上的稳定结构边坡也会在地震力作用下发生破坏现象；而在过渡带内的情况就比较复杂，一般说，不稳定结构边坡的安全高度和坡度偏于下限，稳定结构的边坡偏于上限。即是说，高（度）陡（度）程度落在过渡带内的边坡需进行结构稳定性分析，视具体条件而定。安全带内的边坡是稳定的，危险带内的边坡易出现崩、滑等震害现象。

在基本稳定和 unstable 结构边坡的结构面空间组合中，最不利的组合交线与线路的角距关系对岩质边坡稳定性影响非常明显。图3表示了这种角距关系，从总体上看：①结构面组合交线倾向与线路走向的夹角在62°—90°、组合交线的倾角在18°以上，尤其是18°—50°之间的各类边坡，容易产生崩塌和滑坡等震害。②组合交线的倾向与线路走向夹角在37°以上，倾角在10°以上时，则边坡开始出现坠落等局部破坏。③因为破坏现象多出现在Ⅱ、Ⅴ类结构类型的边坡中，所以①中的范围在很大程度上反映的是碎裂和层状碎裂结构的规律，但对其他结构而言，也很值得注意。

3. 地震烈度 地震对边坡而言是一种附加荷载，一般烈度增加一度，地震荷载也相应增加一倍。另外，在边坡的不同部位地震力也不相同。由辽宁海城地震盘龙山等强震观测及爆破观测结果说明，边坡顶部的地震加速度值约为地面的二倍，且地震反应周期也要变长。

总之，地震力及其周期的变异对边坡稳定极为不利，这是地震区坡顶坠落、崩、滑的最直接的触发性因素，是边坡稳定性分析与评价中不容忽视的。

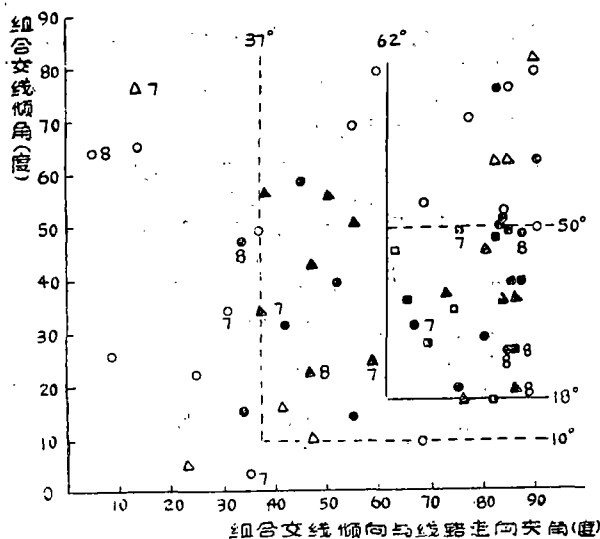


图3 结构面组合交线倾角、倾向与人工边坡空间组合关系图

符号下面的脚注为烈度值，无脚注的为9—10度

结构类型	震害		
	完好	坠落	崩、滑
基本稳定结构	○	▲	□
不稳定结构	●	△	■

由上面的分析得知, 组成边坡岩体的结构及其与人工边坡的空间组合关系是边坡变形破坏的内在原因, 地震力的作用是不可忽视的触发性因素, 地震的影响通过边坡内在的诸种不稳定因素表现出各种震害现象。概括说来有以下几点:

a. 边坡的宏观震害表明, 九度区边坡的破坏现象较为普遍, 八度区轻微震害较多, 边坡整体破坏只是偶有出现, 七度区仅有极个别的震害现象。所以, 在正常条件下, 人工边坡的设防起点可从八度开始。

b. 地震烈度高低或地震力大小对边坡稳定的影响, 可以通过极限稳定边坡的高度和坡度的降低反应出来。由图1可知, 各种结构边坡, 在坡度相同的条件下的安全坡高随烈度的增高而降低约2—3米, 相同高度条件下, 坡度要降低 3° — 4° 。从现有资料出发, 可大致地提出镶嵌(Ⅱ)、碎裂结构(Ⅲ)边坡的高度参考数值表如下:

当边坡坡度为 50° — 75° 时 表四

结构类型 \ 裂度	九度—十度	七度—八度
Ⅱ	10—28米	14—31米
Ⅲ	4—21米	6—24米

c. 地震烈度越高, 边坡开始遭受破坏所对应的组合交线倾角范围越宽。由图3可知, 9° — 10° 与 7° — 8° 区的组合交线倾角范围各为 10° — 90° 、 20° — 63° , 两者上下限大约相差 40° 左右。

总之, 地震区人工岩质边坡的稳定性是十分复杂的问题, 它同非地震区的边坡稳定一样, 首先涉及到区域斜坡的稳定, 对各种岩质边坡而言, 除上述几种因素之外, 地下水的作用、风化、工程特性、施工方法及坡面维护等对边坡的抗震稳定都有影响, 不容忽视。

结 论

1. 地震条件下, 稳定的人工岩质路堑边坡的高度是由组成斜坡的岩体结构来决定的, 其安全高度随坡度的变陡而降低。从地震区宏观震害现象看, 块状结构边坡稳定性好, 镶嵌结构、薄层状结构次之, 碎裂结构、层状碎裂结构边坡受震后易产生边坡破坏, 尤其后者近乎散体结构特征, 需特别警惕。

2. 结构面与人工边坡的空间组合关系, 对边坡破坏的机理至关重要。运用赤平极射投影方法进行边坡稳定性分析的结果表明, 稳定结构边坡震害很少, 不稳定结构边坡震害最多, 说明结构稳定性是造成边坡破坏的重要内在因素。安全带内的边坡稳定性良好, 过渡带内的边坡需进行结构稳定性分析, 视具体条件来决定边坡的高度和坡度, 必要时需采取一些安全抗震措施, 尽量避免在危险带设置边坡。

3. 地震对边坡的稳定而言是一种附加的, 触发性荷载。宏观震害表明, 正常边坡的设防起点以 8° 为宜。同坡度下, 边坡的高度随地震烈度的增高约降低2—3米; 相同高度下, 坡度降低 3° — 4° 。地震烈度越高, 边坡开始破坏(坠落)所反应的结构面组合交线倾角范围越宽, 一般九—十度区为 10° — 90° , 七—八度区为 20° — 63° 。

(本文1980年12月16日收到)

参 考 文 献

- [1] 谷德振著, 岩体工程地质力学基础, 科学出版社, 1979.
[2] 《工程地质手册》编制组, 工程地质手册, 中国建筑工业出版社, 1975.

THE FAILURE AND THE EVALUATION OF THE STABILITY OF
ARTIFICIAL ROCK SLOPE OF
CUT IN MACROSEISMIC AREA

Xu Guo-chang

(Seismological Bureau of Shanxi Province)

Abstract

The failure of artificial rock slope of cut in macrosismic area always causes enormous damage. From the data of various macroscopic earthquake damages in Tonghai, Zhaotong earthquake areas (Yunnan Province) and Haicheng earthquake area (Liaoning Province) and from the point of view of engineering seismogeology, ^{discussion} the structure of rock mass, the spatial combinatory relationship between the structure surface of rock mass and the slope orientation, and the effect of seismic intensity on the stability of the slope of cut are discussed in this paper. In addition, some ideas with practical engineering significance are presented for reference.