

黄土高原北部坍塌灾害的形成机理分析

张永双¹⁾ 张士运²⁾ 曲永新³⁾ 何 锋¹⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081 2) 北京市科学技术委员会, 北京, 100035;
3) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029

摘 要 对黄土高原北部黄土坍塌灾害的调查和室内试验分析表明, 在该区不断发生的坍塌灾害实际上是黄土边坡滑塌的一种表现形式, 其分布与黄土颗粒成分变化的地带性密切相关, 坍塌灾害的形成主要受黄土本身的物质组成、结构及力学性质控制。本文在实例剖析的基础上, 分析了黄土坍塌灾害的形成机理, 并提出了针对性的防治对策。

关键词 黄土高原 砂黄土 滑塌 坍塌

The Mechanism of Cave Dwelling Collapse in Northern Loess Plateau

ZHANG Yongshuang¹⁾ ZHANG Shiyun²⁾ QU Yongxin³⁾ He Feng¹⁾

1) Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing, 100081; 2) Beijing Institute of Science and Technology, Beijing, 100035; 3) Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing, 100029

Abstract Field investigations and in-door experiments indicate that the cave dwelling collapse in northern loess plateau is one of the forms of loess slumping hazards, whose distribution is closely associated with the particle constitution of the loess. The cave dwelling collapse is mainly attributed to the particle constitution, structure and mechanical properties of loess. On the basis of case analysis, the mechanism of the cave dwelling collapse and some corresponding engineering countermeasures are given in this paper.

Key words loess plateau sand-loess slumping cave dwelling collapse

近 20 年来, 在黄土高原北部包括榆林、神木、米脂、子洲、绥德、清涧、子长、靖边、安塞、志丹、吴旗等地, 黄土边坡滑塌诱发的坍塌及伤亡灾害达上百起, 造成数百人死亡和大量窑洞被毁。现场调查表明, 坍塌灾害实际上是黄土边坡滑塌的一种表现形式, 其主要分布在黄土高原的北部地区, 即砂黄土区。随着国家西部大开发战略的实施和全社会地质环境意识的普遍提高, 人们越来越重视对经济欠发达地区地质灾害的研究(曲永新等, 2001; 雷祥义, 1995; 缪祥生等, 1993)。因此, 在西北黄土高原开发建设的同时, 把黄土边坡滑塌引起的坍塌灾害及其综合防治措施作为重点问题进行研究将有利于该区经济的可持续发展。

1 黄土坍塌特点

1.1 坍塌实例

1.1.1 吴旗县石油子沟坍塌灾害 2002年7月25日17时10分, 陕西省吴旗县气象小区石油子沟西

侧黄土斜坡发生滑塌, 造成斜坡底部3孔黄土窑洞毁坏, 窑洞内17人被埋, 经抢救无效全部死亡。毁坏窑洞开挖在晚更新世(Q₃)马兰黄土中, 为拱形、浆砌块石结构。窑洞基面以上原始黄土边坡高20m, 坡角65°左右, 滑塌体宽度12m, 厚度3m, 体积约600m³(图1)。

1.1.2 榆林市张硷村坍塌灾害 1985年1月4日24时, 榆林市榆阳区鱼河峁镇(原桐条沟乡)张硷村Q₃马兰黄土边坡滑塌造成3孔(3户)窑洞毁坏, 死亡22人。窑洞基面以上原始黄土边坡高30m, 坡角55°左右, 窑洞基面以下黄土未见底。据坡前冲沟显示, 窑洞基面下方黄土厚约8m。滑塌体高约25m, 宽度31m, 体积约3500m³。滑塌体向边坡外侧冲出达20m, 冲倒前方的高压电线杆。

1.1.3 清涧县乐堂堡坍塌灾害 1987年1月3日(腊月初四)上午9时, 清涧县乐堂堡镇乐堂堡村Q₃马兰黄土边坡滑塌毁窑5孔, 造成4人死亡。原始黄土边坡高度20m, 滑塌体宽度30m, 高15m, 体



图1 吴旗县石油子沟坍塌窑特征

Fig.1 Characteristics of cave-house collapse in Shiyouzigou of Wuqi county

积约 $2\,500\text{ m}^3$,滑塌后的黄土边坡坡角 45° 左右。

1.1.4 其他灾害 在黄土高原北部,类似于上述情况的坍塌灾害还有很多,前人也曾作过调查统计(缪祥生,1993;雷祥义,1995)。此外,黄土斜坡滑塌直接造成人员伤亡的事例也不少见。例如,1992年6月7日(农历五月初七)上午8时,神木县乔岔滩乡高沙塔村10余名儿童在高沙塔小学旧址附近的黄土边坡下方玩耍,突发性的黄土滑塌将9名儿童掩埋,死亡8人,1人经抢救幸免于难。该黄土边坡由 Q_3 马兰黄土组成,高 $15\sim 20\text{ m}$,原始坡角大于 60° ,边坡顶部近直立。

1.2 坍塌黄土斜坡特点

经现场调查分析,产生坍塌、伤亡灾害的黄土斜坡具有以下特点:

(1)滑塌前的原始黄土边坡主要由厚层马兰黄土(Q_3)构成,少量边坡底部出露离石黄土(Q_2)。黄土边坡高度通常超过 10 m ,边坡总体坡角大于 50° ,并且坡面多为一坡到顶的近平直状。在降雨作用下,斜坡极易受到冲刷,在坡脚处常出现较深的冲蚀沟槽。

(2)导致窑洞毁坏的黄土滑塌体在形态上常呈“马蹄状”或桃形,其后缘均有清晰的环形或半圆形沿垂直张裂隙形成的高约 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 的陡壁,两侧为不同弧度的弧形、底部受滑塌堆积面(宅基地面、道面、河谷底面等)控制。在剖面上除顶部拉张段外,为高角度的光滑弧面或平面,且上陡下缓,总体坡度

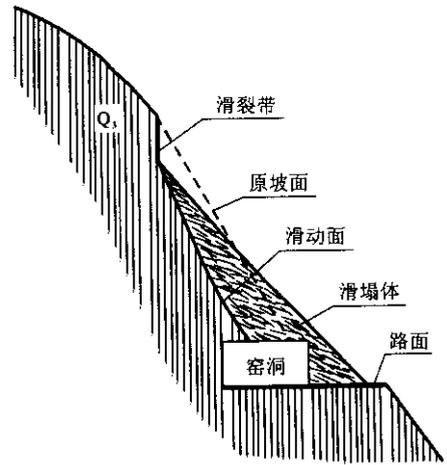


图2 黄土滑塌特征示意图

Fig.2 Sketch map of the appearance of loess slumping

在 $45^\circ\sim 50^\circ$ 左右(图2)。黄土边坡的这种变形破坏形式与大中型黄土滑坡有着显著的不同(张永双等,2002)。

(3)单个滑塌体的规模通常不大,高度可超过 $50\sim 60\text{ m}$,宽度可达 $80\sim 100\text{ m}$,厚度一般在 5 m 左右,通常不超过 10 m ,体积一般仅数千立方米至数万立方米。滑塌体通常表现为由黄土碎块、黄土粉状物构成的松散堆积体,当滑塌规模较大时,在滑塌体的上部会偶尔出现较窄的滑落台阶。

(4)黄土滑塌体的下限一般仅限于天然斜坡的坡脚和人工边坡的台面(如公路道面、窑洞前的地面等),这与黄土滑坡穿切路面直至沟底有本质的区别。

2 黄土坍塌灾害的机理分析

野外调查和室内测试分析表明,坍塌灾害的形成主要受黄土本身的物质组成、结构及力学性质控制,是黄土边坡滑塌的表现形式之一,也是黄土高原北部地区砂黄土和部分粘粉质黄土斜坡特有的地质灾害现象。

2.1 黄土的颗粒组成控制坍塌灾害的区域分布

根据全分散法黄土颗粒分析结果,产生坍塌灾害的黄土中粉砂粒级为 $0.05\sim 0.1\text{ mm}$ 和粗粉土 $0.01\sim 0.05\text{ mm}$ 粒级的含量通常大于 80% , $0.05\sim 0.005\text{ mm}$ 的粉土粒级一般为 $50\%\sim 70\%$,而小于 0.005 mm 的粘粒含量为 $7.31\%\sim 13.41\%$ (表1),按照经典的黄土分带结果(刘东生等,1965),它们多数位于砂黄土区和粘粉质黄土区的北部。而随着黄土粘粒含量的增大,坍塌灾害的出现几率越来越小。

例如,位于黄土高原南部的粘黄土带粒级小于0.005 mm 粘粒质量分数可达 20%~30%,这些地区的坍塌灾害极为罕见。可见,黄土坍塌灾害的发生及其发育程度与黄土本身的物质组成、结构,尤其是与黄土颗粒成分变化的地带性密切相关。

2.2 黄土的力学特性是控制坍塌的内在因素

黄土的物质组成和结构在很大程度上决定着其力学特性,黄土骨架颗粒(0.01~0.1 mm 粉砂和粗粉土颗粒)接触点的性质和数量与黄土天然结构的稳定性直接相关,也就是说黄土骨架颗粒间的连结状况直接影响了黄土的抗剪强度。由于组成砂黄土的粉砂粒和粗粉土粒含量很高,在微观上常表现为具有极微弱连结作用的粗骨架架空结构,导致砂黄土具有较高的摩擦强度,内摩擦角可达 26.93°~30.5°(表 1 图 3-a)。因此,在黄土高原北部地区,砂黄土常形成高陡的天然斜坡,而且滑塌破坏后的滑

床坡度仍可达 45°~50°。同时,极低的粘粒含量决定此类黄土极低的粘聚力,根据试验结果,砂黄土的 c 值仅为 5.0~13.2 kPa(表 1),这在粘性土中是极其罕见的。极低的粘聚力导致坡体在滑动过程中极易发生结构解体破坏,而不是保持整体滑动。

从砂黄土直剪试验应力-位移曲线的形态可以看出,砂黄土的变形具有应变硬化-塑性变形特征(图 4-b)。由于粉砂粒和粗粉土粒含量较高,在较低正向应力时,应力-位移曲线出现波状起伏,并且表现出一定的应变软化特征,但是在位移达到 4 mm 时才出现,说明试样达到极限破坏(突然崩溃)需要一定的历时。砂黄土试样在低应力状态的剪切变形性状可以较好地反映砂黄土边坡的演化和破坏特征。

2.3 边坡形态是坍塌灾害发生的必要条件

边坡的形态主要包括边坡高度、坡角和坡形。

表 1 陕北黄土颗粒组成及物理水理性质测试结果

Table 1 Test results of particle constitution, physical and hydrophilic properties of loess from northern Shaanxi province

地点	地理位置	颗粒组成/%			含水量 /%	干密度 / $(g \cdot cm^3)^{-1}$	液限/%	塑限/%	渗透系数 / $(cm \cdot sec)^{-1}$	抗剪强度	
		>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm						$\varphi/^\circ$	c/kPa
榆林市 张硷村	E38°02'25.9" N109°58'39.4"	40.07	48.08	11.85	7.24	1.35	26.30	17.16	8.9×10^{-3}	30.5	7.7
神木县 高沙塔	E38°32'10.2" N110°24'08.9"	62.04	30.65	7.31	—	—	25.40	17.84	—	—	—
靖边县 刘涧	E37°23'49.4" N108°58'52.9"	37.96	51.07	10.91	9.8	1.35	24.80	17.10	5.6×10^{-3}	26.93	11.0
吴旗县 石油子沟	E36°54'53.7" N108°11'07.1"	40.97	45.61	13.41	—	—	23.60	16.40	—	—	—
清涧县 乐堂堡	E37°14'38.1" N110°08'47.1"	33.04	50.15	12.95	—	—	26.35	17.22	—	—	—

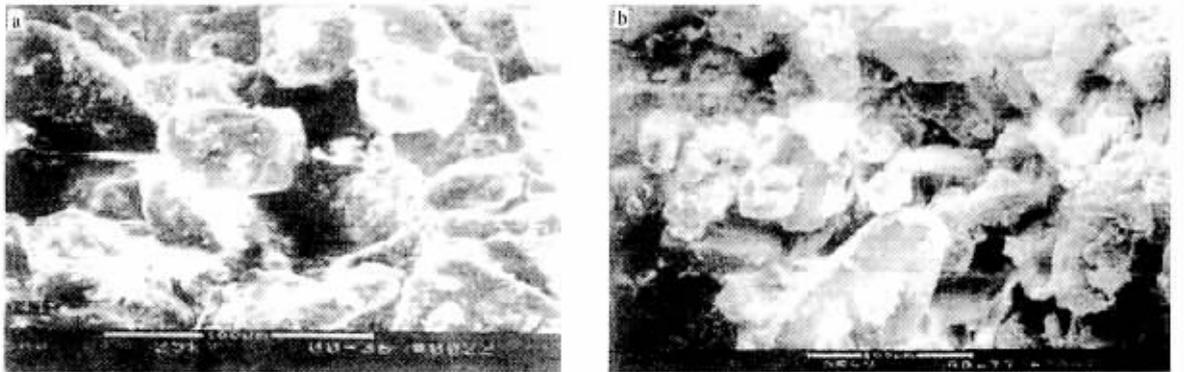


图 3 砂黄土(Q₃)微观结构的 SEM 图像

Fig. 3 SEM image of microstructure of sand-loess(Q₃)

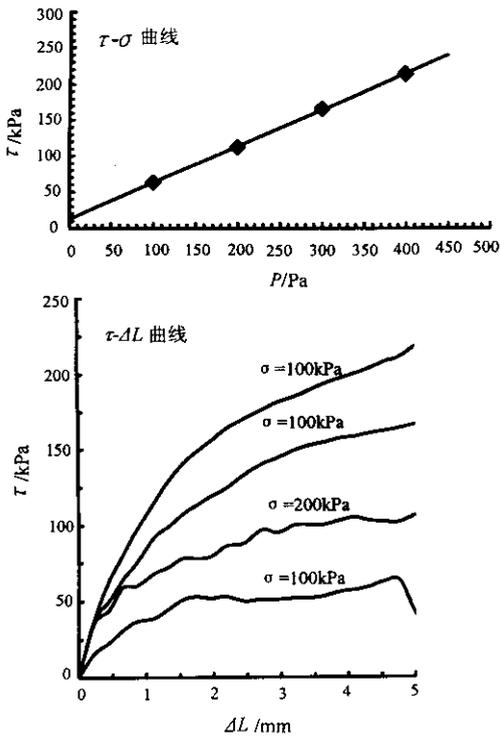


图4 靖边县砂黄土的直剪试验结果

Fig. 4 Direct shear test result of sand-loess from Jingbian

现场调查结果表明,发生坍塌灾害的斜坡高度都在10 m以上,甚至接近100 m,主要由厚层马兰黄土组成,原始黄土斜坡的坡度通常在 50° 以上。并且,发生坍塌灾害的黄土斜坡大都是一坡到顶的平直状,这种坡形既不防冲刷,又会因坡角陡而发生破坏。因此,砂黄土边坡的形态必须与砂黄土的力学特性相适应,并进行适当的坡面防护措施,以适应当地的地质和气候环境。

2.4 降雨等气候因素是坍塌灾害的影响因素

调查表明,并非所有的坍塌灾害均发生在雨季,在旱季也同样会发生,这说明降雨虽是黄土边坡滑塌、导致坍塌灾害的重要影响因素,但不是决定性控制因素。根据前人试验结果,黄土从干燥(含水量 $w=1\% \sim 2\%$)到饱水状态($w>35\%$),内聚力降低的总幅度约90%,内摩擦角衰减幅度仅28%左右(张晓炜,1999)。由此看来,对于以摩擦强度为主的砂黄土而言,降雨对其影响并不是非常明显。降雨对砂黄土边坡稳定性的影响在于:一方面浸湿边坡土体,增大黄土容重;另一方面冲刷坡面和浸湿坡脚,尤其是使坡脚丧失足够的支撑力。实际上,在自然条件下,在川地和大型冲沟两侧,黄土斜坡也可因河水侧向侵蚀或洪水冲刷坡脚(非基岩出露的冲沟、河道)而发生滑塌,并且雨季比旱季发生的频率高。

2.5 人类工程活动的盲目性是坍塌灾害不可忽视的因素

在黄土高原北部,人类工程活动的盲目性主要表现为坡脚排水不利、防水措施不佳、不注意坡比等,使坍塌灾害的发生成为必然。另外,过高地估计窑洞砌体墙体的抗冲击性能也是导致坍塌的重要原因。不仅修建窑洞如此,其他类型的工程活动中类似的现象也常有发生,例如:在川地或大型冲沟中,修筑水库引起的水位抬高、库水浸润坡脚等,可诱发黄土滑塌灾害发生;在黄土塬边和其他黄土斜坡地带,修筑傍山公路、铁路或其他工程建设开挖的边坡,也常因坡高、坡比过大而出现强烈滑塌现象。特别是一些县、乡镇级公路建设中,斜坡内侧虽留有排水沟,但大多未进行衬砌,促使雨水聚集、渗透,坡脚浸水软化,反而易诱发黄土滑塌灾害。

根据现场调查和以上综合分析,坍塌灾害的发生与黄土边坡的滑塌破坏是密切相关的,窑背黄土边坡滑塌的形成过程大致可以分为3个阶段:①早期后缘拉张破坏、滑体座落、前缘强度屈服(结构剪切破坏)坡脚鼓出阶段;②快速滑动阶段;③坡体结构解体、崩落和堆积阶段。由于结构解体是在快速滑动中发生的,因而第二、第三阶段很难严格划分。通常,在大规模滑塌前,在坡顶常有环形裂隙形成和零星掉块现象,可作为滑塌破坏的前兆,应在此时采取必要的防范措施。

3 黄土坍塌的防治措施

随着时代的发展,黄土高原居民建筑的形式变得多种多样,但是依山造居的格局仍没有改变,窑洞因其特有的多种优点,目前仍然是重要的建筑形式之一。因此,针对黄土高原北部黄土的工程特性,探索合理的坍塌灾害防治对策具有非常重要的现实意义。

3.1 合理选择建窑位置

建窑选址时,应尽量选择山形比较完整、排水条件好的缓坡地段。在大型冲沟两侧建窑应选择沟坡稳定、已停止侧蚀且高出冲沟底部6~8 m的坡段,以防洪水冲刷。

3.2 现有窑洞的防灾措施

不管靠近黄土斜坡建设的窑洞结构采用何种形式(土窑洞、接口窑或石窑洞),在靠近高陡斜坡的条件下都有可能受到黄土滑塌的威胁,因此应注意以下方面:

(1)黄土窑背的坡形和坡角要合理。根据现场

调查和黄土力学试验分析,结合陕北地区黄土工程性质和稳定坡度随高度而降低的规律,窑背边坡高度大于6 m时,每增高4 m即应修建1.0~1.5 m宽的台阶(马道),台阶内侧坡脚要修建排水沟,而且排水沟要进行衬砌。也可以将窑背改造成“之”字形,既降低边坡的坡度又便于上塬通行,而且还有利于坡面和坡脚排水(图5)。不管采用何种坡形,当砂黄土边坡高度大于10 m时,其总体坡度不应超过45°。如果边坡高度大于20 m,在考虑修筑多级台阶的同时,最底部一级应选用比上部更缓的坡比。

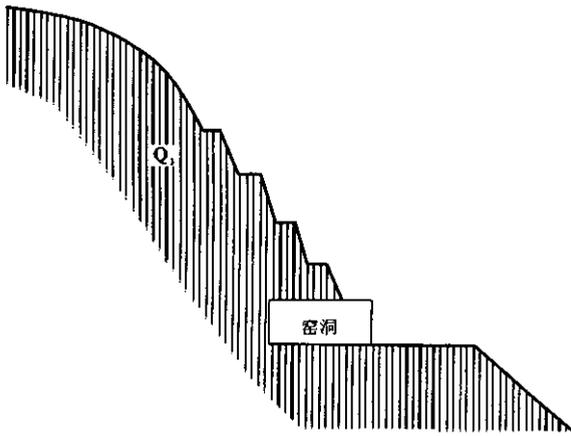


图5 合理的黄土边坡形态

Fig. 5 Sketch map of rational shape of loess slope

(2)加强排水措施。近年来,人们逐渐认识到加强排水对于维护窑洞安全的重要性。但是,未加衬砌的排水沟(包括坡脚和台阶排水沟),不仅不能起到保护边坡的作用,反而会因坡脚积水而加剧黄土边坡的失稳。因此,在修建排水沟时,必须进行衬砌,并且排水沟要紧靠黄土边坡,以防流水对坡脚的冲刷。如果在排水沟附近的坡脚处增加浆砌块石或局部水泥喷浆护坡,效果更好。

(3)为减弱降雨对黄土坡面的冲刷,可以在坡面上种植草皮或灌木,如比较适于黄土高原北部干旱区生长的紫穗槐、沙棘、柠条等。

3.3 合理施工方法

(1)修建窑洞开挖黄土边坡时,洞门部位应及时支护或支撑,并修筑砖石拱门,以便减弱卸荷作用对黄土边坡的影响。在有条件的情况下,可采用加筋混凝土拱门。

(2)洞身开挖过程中,应尽量使窑洞侧壁和洞拱光滑,严禁大块撬挖,窑洞内部最好采用石块衬砌,并边挖边衬砌。

(3)窑背边坡改造要自上向下逐步清理,避免从坡脚处开挖。

以上施工顺序和方法对于减弱开挖对砂黄土结构的损伤具有不可忽视的作用。

参考文献

- 雷祥义,魏青珂.1998.陕北伤亡性黄土崩塌成因与对策研究.岩土工程学报,20(1):64~69.
- 刘东生等.1969.黄河中下游黄土.北京:科学出版社,181~186.
- 缪祥生,韩许恒.1993.榆林地区黄土窑洞崩塌灾害的多发性原因及其防治对策研究.西安地质学院学报,15(3):62~69.
- 曲永新,张永双,陈情来.2001.陕北晋西黄土滑塌灾害的初步研究——以西气东输工程为例.工程地质学报,9(3):233~240.
- 张永双,曲永新,陈情来等.2002.浅析黄土滑塌与黄土滑塌.工程地质学报,10(增刊):258~262.
- 张晓炜,张青山.1999.郑州至洛阳高速公路水毁病害分析.河南交通科技,19(6):39~41.

References

- Lei Xiangyi, Wei Qingke. 1998. Study on the origin and countermeasure of the casualty loess landfalls in the Northern Shaanxi. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 20(1): 64~69 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongsheng et al. 1965. Loess of Mid-lower Reaches of the Huanghe River. Beijing: Science Press, 181~186 (in Chinese).
- Miu Xiangsheng, Han Xuheng. 1993. Reasons for the frequent occurrence of the collapse calamity to the loess cave dwellings in the Yulin area and the prevention-cure countermeasures. Journal of Xi'an College of Geology, 15(3): 62~69 (in Chinese).
- Qu Yongxin, Zhang Yongshuang, Chen Qinglai. 2001. Preliminary study on loess slumping between northern Shaanxi and western Shanxi——Taking the pipeline of transporting gas from west to east as example. Journal of Engineering Geology, 9(3): 233~240 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, Chen Qinglai et al. 2002. Discrimination of loess slumping and loess landslide. Journal of Engineering Geology, 10(Sup.) 258~262 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaowei, Zhang Qingshan. 1999. Cause analysis of washout of Zhengzhou-Luoyang expressway. Science and Technology of Henan Communication, 19(6): 39~41 (in Chinese with English abstract).