

# 山西吉县黄土崩塌地质灾害的模式

李雨株<sup>1</sup> 李杰<sup>2</sup>

(1. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 2. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

**【摘要】** 黄土崩塌是吉县的主要地质灾害, 崩塌体从形成到发生, 是一个局部蠕变—大部渐进性破坏—突变失稳的过程。对已发生的黄土崩塌地质灾害主控因素进行分析, 可将其归纳为坡面饱和剥落型、冻融崩塌型、植物根劈崩塌型、节理切割崩塌型、危岩(土)体失稳崩塌型、坡体剪切破坏崩滑型等六个崩塌模式。通过对黄土崩塌地质灾害进行分析研究, 探索其演变和发灾模式, 对防灾减灾工作具有积极的参考意义。

**【关键词】** 黄土崩塌; 饱和; 抗剪力; 失稳

**【中图分类号】** P 642. 21

**【文献标识码】** A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2020. 04. 003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Geological Disaster Model of Loess Collapse in Ji County, Shanxi Province

Li Yuzhu<sup>1</sup> Li Jie<sup>2</sup>

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China;

2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100038, China)

**【Abstract】** Loess collapse is the main geological disaster in Ji County, Shanxi Province. Collapse is a process of partially creep—mostly progressive failure—abrupt instability. Based on the analysis of the main controlling factors of the loess collapse, 6 collapse models are summarized, including saturated slope spalling type, freezing-thawing collapse type, plant root splitting collapse type, joint cutting collapse type, unstable rock (soil) collapse type, slope shear failure collapse type. The analysis of the evolution and the disaster model of collapse has reference significance for disaster prevention and reduction.

**【Key words】** loess collapse; saturability; shear resistance; instability

### 0 引言

山西省吉县地质灾害主要是黄土崩塌及滑坡, 受特殊地质环境条件控制, 吉县县域内黄土残塬及黄土冲沟发育, 黄土残塬前沿及黄土冲沟两侧的黄土斜坡受降水切割侵蚀均呈陡立状, 高陡的黄土斜坡为黄土崩塌、黄土滑坡地质灾害的形成创造了条件。沿黄土冲沟走向, 常常可见由降雨、冻融、地表径流侵蚀坡脚等自然因素诱发形成的黄土崩塌、滑坡等不良地质现象<sup>[1-4]</sup>。

吉县地处黄土高原, 沟壑纵横、地形复杂, 是山西地质灾害较为严重的地区之一。通过地质灾害详细调查工作, 目前查出已发生地质灾害 38 处, 多为黄土崩塌; 查明地质灾害隐患点 241 处。

吉县黄土崩塌从崩塌体形成到崩塌发生, 是一

个局部蠕变—大部渐进性破坏—突变失稳的过程, 该过程具有隐蔽性和突发性强、预测困难的特点, 对其进行分析研究, 探索其演变和发灾模式, 对防灾减灾工作具有积极的参考意义<sup>[5-7]</sup>。

### 1 吉县区域地质及气候概况

吉县属暖温带半干旱气候, 四季分明, 夏季炎热、冬季寒冷、春季温暖、秋季凉爽; 县域昼夜温差较大, 降水随空间、季节、年际变化而变化也是吉县的气候特点。据吉县气象局中心站 1985 年 1 月 16 日至 2015 年 12 月 30 日的统计资料, 年平均气温 10 °C, 县境东、西温差在 5 °C 左右, 年内以 1 月份最冷, 月均气温 -4. 2~6. 4 °C, 极端最低气温 -21. 3 °C (2002 年 12 月 26 日)。七月均温 19. 5~24. 5 °C, 极端最高气温 39. 8 °C (2002 年 7 月 10 日)。一般

在每年 11 月开始封冻,翌年 3 月上旬开始解冻,标准冻深 0.82 m。

县域总体表现为一向 NWW 缓倾的单斜构造,自南东向北西,地层出露依次变新。区内除东部及西北部基岩山区外各处均有大面积第四系上更新统、中更新统、下更新统黄土分布。

人类工程活动主要为削坡脚、修路建房等,降水和人类工程活动成为触发地质灾害的重要因素。

## 2 吉县区域黄土崩塌类型

受陡峻的黄土斜坡地貌和松散的地层结构等地质环境条件控制,同时受强烈的人类工程活动影响,吉县黄土覆盖区的黄土崩塌地质灾害频发,2005 年以来,黄土区发生的黄土崩塌地质灾害数量占全县地质灾害总数的 90% 以上,综合分析已发生黄土崩塌地质灾害的主控因素,可将其归纳为坡面饱和剥落型、冻融崩塌型、植物根劈崩塌型、节理切割崩塌型、危岩(土)体失稳崩塌型、坡体剪切破坏崩滑型等模式<sup>[8]</sup>。各类型如图 1—图 6 所示。

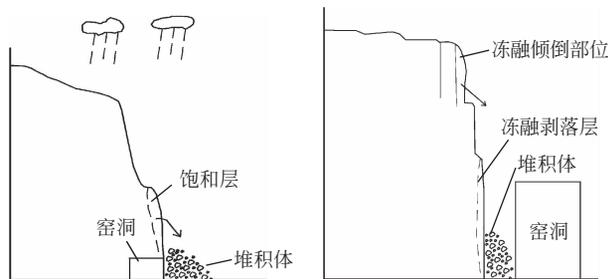


图 1 坡面饱和剥落型

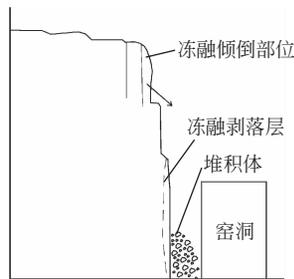


图 2 冻融崩塌型

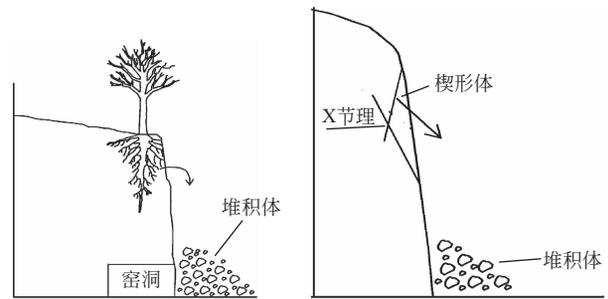


图 3 植物根劈崩塌型

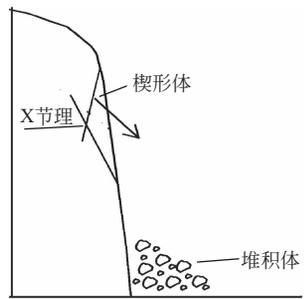
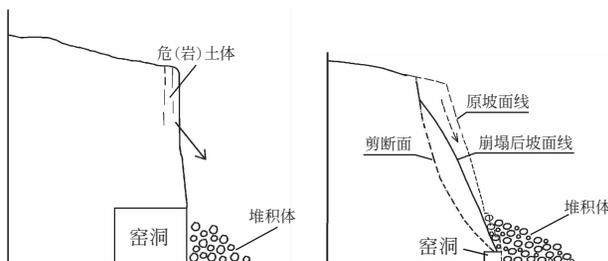


图 4 节理切割崩塌型



5 危岩(土)体失稳崩塌型

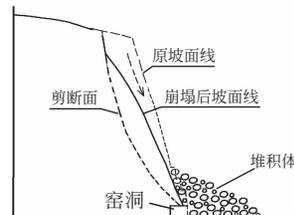


图 6 坡体剪切破坏崩滑型

## 3 黄土崩塌野外主要判别方法

### (1) 地形地貌

地形是黄土崩塌地质灾害形成的基础条件。区内丘陵、沟壑地貌广泛,地形破碎,构成了崩塌形成的地形地貌条件。

### (2) 地层

土质崩塌土体主要是第四系中、上更新统( $Q_2$ 、 $Q_3$ )黄土,这与区内中、上更新统的地层结构、颗粒成分及力学性质等特征有密切关系。岩性特殊的中、上更新统黄土是土质崩塌发生的必备条件,野外判别时应注意地层的识别划分,必要时使用采样分析等手段。

### (3) 自然水

区内中更新统黄土呈盔状覆于基岩之上,厚度大,为 60~100 m。上更新统黄土呈斗篷状披覆在塬梁崮的表面,厚度小,在许多地区甚至缺失。中更新统黄土类粉质黏土夹古土壤条带及钙质结核层,土中黏粒含量较高,黄土中易溶盐对黄土颗粒也具有胶结作用,但这种胶结作用是有条件的:当黄土中含水量很低时,它有胶结作用;当黄土中的含水量较高时,它便以离子状态存在而不具胶结作用,黏聚力及抗剪强度降低,在黄土埋藏深度稍大、湿度稍高一些时,不具有胶结作用。在饱水或潮解时,其黏聚力及抗剪强度降低,坡体易失稳发生崩滑。野外判别应着重调查土体与自然水的作用关系。

### (4) 人类工程活动

在崖壁开挖窑洞时,坡面土体在干燥的过程中土体收缩易产生垂直劈理,其后所形成的黄土柱底部的黄土,在上覆垂直土层自重压力下破坏易引起窑面、窑顶塌落。除此之外,还有植物根劈作用产生的垂直劈理,将土体切割成垂直土体与母体分离,在降水及自重作用下垂直土体发生塌落。野外判别要重点针对人类工程活动引起的崩塌隐患进行调查。

图 7—图 10 为吉县野外调查的各类型黄土崩塌照片。



图 7 吉县孙家沟冻融引发黄土崩塌



图 8 吉县李家沟切坡建房引发黄土崩塌



图9 吉县水洞沟切坡建房  
引发黄土崩塌



图10 吉县劳模沟切坡  
建房引发黄土崩塌

#### 4 各类黄土崩塌的发生过程分析

##### 4.1 坡面饱和剥落型

坡面饱和剥落崩塌模式易发时间主要在汛期,常发生在黄土不稳定斜坡的坡顶及坡面陡缓接触带的下缘,持续的大气降水下渗后,造成表层黄土体含水率逐渐达到饱和状态,由于黄土体具有很强的水敏性特征,土体饱和后抗剪能力急剧下降,土体抵抗自身重力作用的抗力逐步下降,抗力降至接近或低于重力形成的下滑力后,饱和土体会有可能失稳向临空方向崩落,其发展的过程为:

坡顶及缓坡面土体接受降水下渗→土体逐渐饱和→土体重力增大而抗力逐渐下降→土体抗剪力与重力形成的下滑力处于平衡状态→平衡状态被打破→饱和土层之下被拉断→土体失稳并脱离母体形成黄土崩滑地质灾害。

##### 4.2 冻融崩塌型

黄土坡面一定深度内的土体每年要经历一次季节冻融循环过程,在冻结时,浅层温度低于内部温度,土体深部水分会向浅部迁移并在浅部与土粒一同冻结,冻结产生的冻胀力会破坏土体颗粒之间的黏聚力。春季气温回升时,冻土层内冰晶融化,冻结力消失,由于土粒间黏聚力被降低,使得土体抗剪强度下降,土体结构会进一步向疏松状态发展。累年的反复冻结与消融,土体结构损伤会累积加重,达到一定次数后,临空的冻融土体会失稳发生崩塌地质灾害。

根据崩塌体与母坡间的破坏面形式,可将其分为两个亚类,一类是沿冻层与非冻层交界面产生剥落破坏,另一类是沿凸突土体底部冻结力突然消融消失,抵抗不住上方土体重力而形成一相对薄弱部位,薄弱部位土体被压折断而发生倾倒破坏。两亚类都遵循冻融致使抗剪力降低,在重力作用下使崩塌体失稳的规律,其过程为:

黄土坡面浅层土体→反复冻胀与消融→土体结构逐步破坏,抗剪力逐渐下降→土体重力与土体抗剪力+冻结力合力处于平衡状态→冻结力消融平衡

被打破→冻与非冻层间拉断(凸突土体下部薄弱处折断)→崩塌体失稳并脱离母体形成黄土崩塌地质灾害。

##### 4.3 植物根劈崩塌型

发生在坡顶边缘及陡峻坡面的灌木或乔木发育处,植物根系的根劈作用破坏力表现在两个方面:一是根系下伸和加粗破坏了临空土体与母坡间的黏聚力并产生向临空方向的推力;二是季风吹动树冠摇摆致使根系对土体产生向临空方向的推力。根劈型黄土崩塌的发生,是土体间抗剪力与其自身重力的平衡被打破的过程。具体发展过程如下:

黄土坡顶缘及坡面陡峻处→乔灌木生长发育→根系呈线状排列并将临空土体与母坡逐渐分割→根系逐步增长加粗,使两侧土体间结合力逐渐下降→土体抗剪力与土体重力+根系生长推力+季风间接推力的合力处于平衡状态→土体的平衡被打破→根系两侧土体被拉断→外侧土体失稳并朝临空方向倾倒而形成黄土崩塌地质灾害。

另外,高陡黄土边坡顶部的输电线路的电杆也会产生与植物根劈作用相似的效果,当电杆埋设位置距离坡顶边缘过近时,电杆及电线在季风作用下强烈摇摆,电杆埋设部分也会产生向临空方向的推力,久而久之,外侧临空土体有可能发生黄土崩塌,2012年柏山寺乡发生的“5·26”黄土崩塌就有电杆影响因素。

##### 4.4 节理切割崩塌型

黄土构造节理是区域构造应力场的产物,构造节理会切穿各时代的黄土层,成为黄土体的软弱结构面。黄土构造节理形成的软弱结构面产状与黄土斜坡的临空面呈不利组合时,有发生节理切割型黄土崩塌地质灾害可能。就已发生的节理切割型黄土崩塌归纳分析,可分为两类不利组合形式,一类是单一节理面与临空面近乎平行且节理面倾角小于临空面倾角,一类是一组X节理面与临空面正交。前者的崩塌体呈层状,后者的崩塌体呈楔形体。两类形式中,内在控制因素均为黄土构造节理形成的软弱结构面,外在因素为外动力作用,如自然侵蚀、地震、人类经济活动造成的地面振动等。总之,黄土构造节理为节理切割型黄土崩塌的形成创造了内在条件,一旦在外界的动力作用触发下打破结构面间的力学平衡,便形成黄土崩塌地质灾害。其演变过程为:

构造节理发育的陡峻黄土边坡→节理面与临空面呈不利组合→节理面抗剪力大于被切割土体重力

形成的下滑力→节理面的抗剪力逐渐下降并向软弱结构面转化→结构面抗剪力与土体重力形成下滑力处于平衡状态→外动力地质作用或人类经济活动影响→土体的平衡被打破→结构面两侧被拉断或剪断→土体失稳朝临空方向崩滑或坠落形成黄土崩塌地质灾害。

#### 4.5 危岩(土)失稳崩塌型

自然形成或人为削坡形成的黄土高陡边坡常发育有陡峻及凸突土体,该部分土体长期暴露在外,受到各种外部营力的作用,使坡形进一步向直立及负坡形发展,最终在重力作用下失稳产生崩塌现象。危岩(土)体重力失稳是长期地壳运动和地质作用的一种结果,其变形失稳是一个从局部蠕变到大部渐进性破坏最终发生突变的过程:

节理不发育的陡峻黄土边坡→凸突土体暴露坡面外→长期遭受暴晒、降水、风蚀、冻融等外动力地质作用影响→凸突土体下侧局部抗力逐渐下降→为保持平衡凸突土体重力逐渐产生对后壁的拉力→下部支撑力及后壁拉力的合力大于土体重力→受外动力地质作用进一步影响,下侧局部抗力进一步下降→凸突土体与后壁间出现张性卸荷裂隙→外动力地质作用或人类经济活动影响→凸突土体的平衡被打破→凸突土体与后壁间被拉断→土体失稳朝临空方向倾倒形成黄土崩塌地质灾害。

#### 4.6 坡体剪切破坏崩塌型

##### (1)局部剪切破坏崩塌型

黄土斜坡的天然应力场以自重应力为主,经地质历史时期的内外地质作用,斜坡的自重应力与黄土坡体抗剪力已达应力自然平衡,人工削坡及改变坡面形态会破坏其自然应力平衡,尤其是削切坡面的几何断面不合理,会导致坡体局部剪应力集中,在较高剪力作用下,容易形成局部剪切破坏型黄土崩塌,过程为:

自然黄土斜坡→人工削坡改变原始坡面形态破坏坡体自然应力平衡→新坡体在重力作用下应力重新分布→新坡体几何断面不合理区的上部拉应力逐渐增大,下部剪应力逐渐集中→上下部土体开始弹性变形,以保持应变所需抗拉及抗剪力→上部土体拉伸至极限,出现拉裂缝→下部土体压缩至极限,出现剪裂缝→外动力地质作用或人类经济活动进一步

影响→几何断面不合理区土体平衡被打破→上部土体后缘彻底拉断,下部土体全部剪断→几何断面不合理土体失稳朝临空方向崩滑形成黄土崩塌地质灾害。

##### (2)整体剪切破坏崩塌型

人工大面积开挖高陡黄土斜坡的坡脚,会打破黄土斜坡原有的自然力学平衡,致使高陡斜坡被动地重新建构新的力学平衡体系,力学平衡重新构建过程,是坡体重力与坡土体弹性变形应力的重新分布过程,应变随着时空变化,直到建立新的平衡为止。若应变随着时空变化,坡体达不到建立新的应力平衡条件,即会整体失稳形成黄土崩滑。其过程为:

自然黄土高陡斜坡→大面积削切坡脚破坏了斜坡底部的抗力→由于坡底抗力消失,坡体自然应力平衡被打破→坡体应力开始重新分布过程→为补充消失的底部抗力,坡体中下部的剪应力逐渐增大,中上部拉应力逐渐增高→为提供应变所需抗拉及抗剪力坡体,各部位土体进入弹性变形阶段→中上部土体开始拉伸变形,以提供坡体应力平衡所需的拉力→中下部土体开始压缩变形,以提供坡体应力平衡所需的抗剪力→土体的拉伸及压缩变形均达到自身极限,尚满足不了坡体应力平衡所需的抗拉力及抗剪力→坡体各部位土体进入塑性变形阶段→斜坡顶部一定范围内逐步出现张拉裂缝→斜坡中下部坡面逐渐出现剪裂缝→外动力地质作用或人类经济活动进一步影响→坡体整体平衡被打破→坡顶后缘彻底拉断,坡体下部土体全部剪断→整个坡体失稳朝临空方向崩滑形成黄土崩塌地质灾害。

## 5 各类黄土崩塌的易发期、诱发因素及临灾征兆

黄土崩塌的隐蔽性和突发性特点,是由黄土的弹塑性、脆弱性、水敏性等工程性质所决定,黄土坡自然应力平衡被打破后,其会利用黄土的弹性和塑性应变性能进行调整,当达到弹性和塑性极限时会立即崩溃,即使不崩溃而达到新的平衡,在运营期间,若出现足够能量的外动力作用激发,也可能发生崩塌。黄土遇水后抗剪力急剧下降使得坡体应力平衡打破,也是造成崩塌突发的内在因素。各类黄土崩塌模式的易发期、诱发因素及临灾征兆分析如表1所示。

表1 各类黄土崩塌模式的易发期、诱发因素及临灾征兆分析表

| 类型        | 易发期  | 诱发因素   | 临灾征兆  |
|-----------|--|--|---|
| 坡面饱和剥落型   | 发生在每年汛期及丰水年的9—10月;在持续降水过程中或后滞一定时间                    | 强降雨、持续降雨是主要因素,地震或人类活动引发的地面振动往往成为发灾的激发因素                        | 坡面局部土体明显饱和、其土体色度与周边坡面有显著差异、过湿坡面两侧出现纵向羽裂、饱和坡面有泥流坠落   |
| 冻融引发崩塌型   | 易发在2—4月间,个别年份延至5月;融冻期人类工程活动剧烈时段更易发;一般阳坡发生在融冻早期,阴坡在晚期 | 冻土消融、地震、机械振动、强烈的冲击波  | 坡面节理裂隙或坡顶垂直裂隙有增大迹象;坡体偶有异响、地面轻微振动即有掉块现象;当日掉块并逐渐频繁,是崩塌最危险的前兆                                |
| 植物根劈崩塌型   | 常发生在春冬季风季节和植物生长期,也易发生在汛期强对流天气过程期间                    | 强季风和强对流天气、强降雨、持续降雨、地震、机械振动                                     | 坡顶植被及电杆位置出现平行坡沿的裂缝;根系发育坡面有明显异常或有连续性掉块;大风气象预警期树冠或电线摇曳摆幅过大                                  |
| 节理切割崩塌型   | 汛期、人类工程活动剧烈期、融冻期                                     | 大气降水入渗节理面、冻胀影响深入进节理面;引发周边地表有长时间微振动的人类经济活动;地震、爆破、剧烈的机械振动、强烈的冲击波 | 坡顶地面节理切出位置出现明显线状异常;坡面节理分布区出现新鲜的线状裂隙张开;坡体节理发育区有异常落土掉块现象                                    |
| 危岩(土)失稳型  | 融冻期、汛期、人类工程活动剧烈期                                     | 大气降水、冻胀消融、引发周边地表有长时间微振动的人类经济活动、地震、爆破、剧烈的机械振动、强烈的空气冲击波          | 边坡凸突土体表面垂直节理裂隙增多增大;凸突土体色调与周边坡面土体明显不协调;凸突土体表面有频繁掉块现象                                       |
| 坡体剪切破坏崩塌型 | 局部剪切崩滑型  | 人工削切坡的后几周或较长时间段  | 直接诱发因素是不合理削坡、在坡体应力调整期间的大气降水和地震及剧烈的机械振动均是诱发崩塌发生的重要因素                                       |
|           | 整体剪切崩滑型  | 大面积削切坡脚后或滞后更长时间  | 直接诱发因素是大面积开挖坡脚及不合理削坡;在坡体应力调整期间的大气降水和地震及剧烈的机械振动均是诱发崩塌发生的重要因素;坡脚大范围内的土体含水量增高,也是诱发坡体整体失稳因素之一 |

## 6 结论

通过对吉县已发生的黄土崩塌地质灾害的综合分析,可将其归纳为坡面饱和和剥落型、冻融崩塌型、植物根劈崩塌型、节理切割崩塌型、危岩(土)体失稳崩塌型、坡体剪切破坏崩滑型等6种模式,这6种黄土崩塌模式均有发灾快和前兆不明显的共同特征,但是这6种黄土崩塌模式的易发期、诱发因素和临灾征兆均不相同。通过对这6种黄土崩塌模式的研究,可以指导防灾负责人、监测人员以及受灾群众认识黄土崩塌地质灾害。通过群测群防体系的落实、明确各隐患点监测及观察部位、加强易发期监测力度、实施易发期内危险区的住户临时避险、限制在地质灾害危险区进行工程活动等综合方法和措施,最大程度减少黄土崩塌造成的危害和损失。

### 参 考 文 献

[1] 孙博,彭宁波,陆继财. 降雨条件下黄土边坡的稳

定性分析[J]. 人民黄河, 2016(11): 33-35.

[2] 孙永帅,贾苍琴,王贵和. 降雨对边坡稳定性影响研究综述[J]. 施工技术, 2012, 41(17): 63-66.

[3] 唐栋,李典庆,周创兵,等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3239-3248.

[4] 叶万军,王鹏,杨更社,等. 黄土崩塌的形成因素及其影响范围的确定方法[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 920-925.

[5] 苏栋. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2015.

[6] 化建新,郑建国. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.

[7] 黄来源. 北京突发地质灾害应急调查工作探讨[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(5): 237-241.

[8] 彭军,李翔宇,闫蕊鑫,等. 陕北地区黄土崩塌破坏模式分类及防控对策研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(10): 11-16.

收稿日期:2020-01-16