

倾倒型黄土崩塌稳定性判据及其影响范围研究

叶万军, 董西好, 杨更社, 李晓

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘 要: 倾倒型黄土崩塌是黄土地区常见的一种灾害。根据倾倒型黄土崩塌的形成特征, 分别由静力平衡条件的临界状态与塑性流动临界状态得到倾倒型崩塌垂直裂隙长度的上、下限解; 根据摩尔库仑准则, 得到崩塌体底面产状。由以上结果确定倾倒型崩塌体的几何特征; 再根据力的平衡、力矩平衡条件, 建立倾倒型黄土崩塌的稳定性判据, 实现对倾倒型黄土崩塌的稳定性评价。根据发生倾倒变形的条件, 建立了倾倒型崩塌体的运动学方程。通过求解, 可再现倾倒型黄土崩塌发生后的运动轨迹, 确定崩塌体的致灾范围。研究结果揭示了倾倒型崩塌体的形成机制, 为确定倾倒式黄土崩塌治理方法及确定建设项目的安全距离的确定提供理论依据。

关 键 词: 黄土崩塌; 倾倒; 稳定性判据; 影响范围

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Stability criterion and influencing zone of loess collapse with toppling style

YE Wan-jun, DONG Xi-hao, YANG Geng-she, LI Xiao

(College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Loess collapse with toppling style is one of the common disasters in loess area. Based on its forming feature, the solutions of upper and lower bound for vertical fracture of the loess collapse are derived in light of the critical state of both static equilibrium and plastic flow. The underside attitude of the collapse is calculated by the Mohr-Coulomb criterion. Thereby the geometric characteristics of the collapse can be determined; then the stability criterion is established based on the balance of force and torque; and the stability evaluation of loess collapse with toppling style is realized. The kinematics equation for loess collapse with toppling is built by its toppling deformation conditions. By solving the equation, the trajectory of the loess collapse with toppling style is reconstructed; and the range of the disaster can be detected. The research results reveal the forming mechanism of loess collapse with toppling style, so as to provide a theoretical basis for its governance approaches and its identification with the safe zone of construction project.

Key words: loess collapse; toppling style; stability criterion; influencing zone

1 前 言

黄土崩塌是黄土高原常见的一种灾害。1985~1994 年的不完全统计, 陕北黄土高原共发生 92 处黄土崩塌, 造成 275 人死亡, 40 余人受伤, 227 孔窑洞被毁^[1]。2001~2005 年间, 延安市黄土崩塌灾害造成延安地区 73 人死亡, 10 人受伤^[2]。近年来, 黄土地区崩塌灾害发生的频次有增无减, 直接威胁着人民群众生命财产的安全。黄土崩塌作为黄土地

区常见灾种较早被人们注意^[3-4]。上世纪六十年代早期的研究多集中于崩塌的形成条件、发育规律及处理措施等定性描述方面^[5]。上世纪九十年代以来, 人们的认识由感性上升到理性阶段, 以对崩塌的形成机制和各类崩塌的稳定性进行研究为特点。其中, 崔政权等对黄土崩塌的稳态形式、作用动力源、后期改造形式等进行了探讨^[6]。雷祥义等探讨了控制典型宅基边坡伤亡性黄土崩塌稳定性的主要几何因子及其是如何影响崩塌的稳定性等相关问题^[7]。胡

厚田等建立了不同类型崩塌稳定性的验算方法, 提出了崩塌综合预测的方法^[5]。徐茂其、王昕等还对崩塌进行了发育分期研究^[8]。曲永新等从微观的角度出发, 研究了黄土黏粒含量和黄土崩(滑)塌灾害发育程度之间的关系^[9]。王根龙根据离散元数值模拟, 结合野外黄土崩塌变形破坏特征及地质现象分析, 研究了黄土崩塌的破坏模式^[10]。由于黄土崩塌形成机制的复杂性, 目前关于黄土崩塌的研究集中于形成条件、破坏类型、影响因素及处治技术等方面, 而关于黄土崩塌的稳定性判据及形成机制等方面的工作尚需深入。倾倒型崩塌是各类黄土崩塌种类最多的一种^[11], 目前关于倾倒型崩塌稳定性分析主要是以定性评价为主^[10], 也有一些专家学者提出了简单的稳定性计算公式^[11-12], 但这些理论计算只考虑崩塌倾倒体全部断开后的力学平衡, 很少考虑岩土体的结构特征, 也未考虑土体的摩尔库仑准则, 采用这样的理论公式得到的结果还需进一步验证。

本文根据倾倒型崩塌的形成特征, 分别由静力平衡条件的临界状态与塑性流动临界状态得到倾倒型崩塌垂直裂隙长度的上、下限解, 根据摩尔库仑准则, 得到崩塌体底面产状。由以上结果确定倾倒型崩塌体的几何特征; 再根据力的平衡、力矩平衡条件, 建立倾倒型黄土崩塌的稳定性判据, 实现对倾倒型黄土崩塌的稳定性评价。根据发生倾倒变形的条件, 建立了倾倒型崩塌体的运动学方程, 通过求解, 可再现倾倒型黄土崩塌发生后的运动轨迹, 确定其影响范围。研究结果揭示了倾倒型崩塌体的形成机制, 为确定倾倒型黄土崩塌治理方法及确定建设项目的安全距离提供理论依据。

2 倾倒型黄土崩塌形成机制力学分析

2.1 倾倒型崩塌的形成过程

黄土开挖卸荷后, 坡体内垂直节理张开, 垂直层面间的应力释放, 围压降低, 土体完整性降低, 更容易接受降雨入渗。黄土遇水湿陷, 土体力学性能劣化, 从而导致了层间抗滑能力降低, 坡脚受到很大的自重应力而产生不均匀变形。坡脚达到塑性状态后, 出现不均匀沉降, 强度也由峰值降为残余值, 从而在坡顶产生拉力区而产生平行坡面的张拉裂隙。垂直裂隙继续扩展, 在降雨、集中径流的继续作用下, 在集中径流的冲蚀下, 裂隙扩大, 并继续向深处发展, 一直发展到其极限深度为止。当黄土张拉裂缝、大孔隙的地下水未能及时排出, 可形成相当大水平力, 从而形成以坡面某点(理论上该

点为保持黄土直立的最高位置)为矩心的转动动力矩。当转动动力矩大于抗倾覆力矩时, 便形成倾倒型崩塌。

2.2 倾倒型崩塌模型建立

崩塌体在破坏之前可看作是处在复杂环境条件下的黏弹塑性体, 忽略崩塌体的时效硬化及由于变形引起的几何尺寸的改变, 则倾倒体满足机动许可的应力场, 崩塌体高度为 h , 垂直应力为 σ_1 、侧向应力为 σ_3 , 黄土的黏聚力为 c , 内摩擦角为 φ , 黄土的重度为 γ , 倾倒体的高度为 h 。假设倾倒体的变形速度为 v 。

则自重做的功:

$$W_{\text{自重}} = \frac{1}{2} \gamma h^2 v \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (1)$$

沿破裂面的内能耗散率为:

$$D = (\tau v \cos \varphi - \sigma v \sin \varphi) \frac{h}{\sin(45^\circ + \frac{\varphi}{2})} \quad (2)$$

根据摩尔-库仑准则, $\tau = c + \sigma \tan \varphi$, 土体自重做的功等于沿破裂面的内能耗散率, 即:

$$\frac{1}{2} \gamma h^2 v \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) = \frac{ch}{\sin(45^\circ + \frac{\varphi}{2})} v \cos \varphi \quad (3)$$

从而得到倾倒体临界高度的上限解:

$$h = \frac{4c}{\gamma} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (4)$$

假设倾倒体满足静力许可的应力场, 最大主应力为 σ_1 , 最小主应力为 σ_3 , 则土体力平衡方程:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (5)$$

最大主应力为:

$$\sigma_1 = \gamma h \quad (6)$$

黄土开挖卸载后, $\sigma_3 = 0$, 因此 $\gamma h = 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$, 黄土块体发生倾倒变形, 从而得到倾倒体临界高度的下限解:

$$h = \frac{2c}{\gamma} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (7)$$

因此, 黄土体在 $\frac{2c}{\gamma} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \leq h \leq \frac{4c}{\gamma} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ 的横断面范围内出现剪应力下降的“潜在层状面”。

随着坡体变形进一步发展, 黄体向临空面的倾倒变形加剧, 在张拉裂隙中产生的力矩的作用下, 黄土体沿着“潜在层状面”滑移。伴随着滑移的发展,

因下部受阻,黄土体沿着临空面从坡脚开始从下至上作悬臂梁弯曲。当土体弯曲到一定的程度,在最大弯曲的部位产生断续的折断面。随着弯曲变形的加剧并逐渐向坡内发展,当不同部位最大弯曲、弯

折带部位相互贯通、并形成倾向坡外的断续的拉裂面时,黄土体将沿该折断面发生蠕滑变形,最终在重力作用下形成倾倒型崩塌。图 1 为倾倒型崩塌过程示意图。

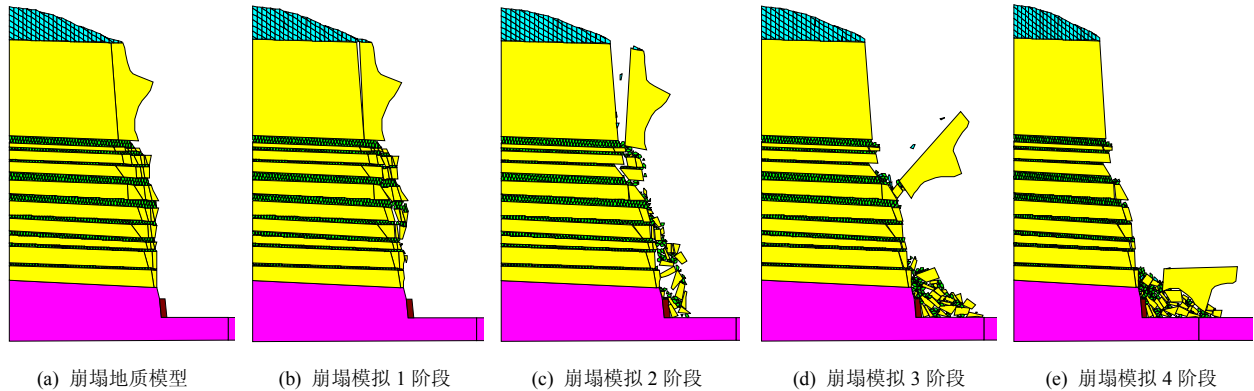


图 1 倾倒型黄土崩塌的形成过程

Fig.1 The formation process of the loess collapse with toppling style

2.3 倾倒型黄土崩塌形成的力学机制

2.3.1 倾倒型黄土崩塌形成模型及稳定性判据

由倾倒型黄土崩塌的形成过程倾倒型黄土崩塌的运动形式一般为翻转滚动。设对于边坡上单个黄土块体受力分析如图 2, 根据力的平衡及力矩平衡, 可得式 (8)。

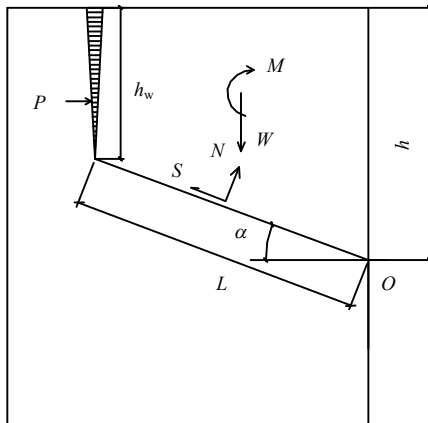


图 2 倾倒型黄土崩塌受力简图

Fig.2 Force diagram of loess collapse with toppling style

$$\left. \begin{aligned} S - W \sin \alpha - P \cos \alpha &= 0 \\ W \cos \alpha - N - P \sin \alpha &= 0 \\ P\left(\frac{1}{3}h_w + L \sin \alpha\right) + W \sin \alpha L_1 &= W \cos \alpha L_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: P 为静水压力 (kPa), 作用点在倾倒体内侧高度的 $1/3$ 处; S 为倾倒体底部的摩擦力 (N); W 为重力 (N); α 为破裂面的倾角 ($^\circ$), 理想状态

下, $\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$; h 为黄土倾倒体的高度 (m); L

为黄土倾倒体宽度 (m); L_1 、 L_2 分别为重力平行底面和垂直底面分量到 O 点的力臂 (m)。

由以上平衡条件可得:

$$\frac{S}{N} = \frac{W \sin \alpha + P \cos \alpha}{W \cos \alpha - P \sin \alpha} \quad (9)$$

上式说明在倾倒体所受剪切力和正压力的比值与底面倾角、重量及水平力有关, 可得到斜坡上黄土不倾倒的条件为:

$$\frac{W \sin \alpha + P \cos \alpha}{W \cos \alpha - P \sin \alpha} \geq \frac{S}{N} \quad (10)$$

根据力矩平衡, 可得倾倒体的稳定性判据:

$$F = \frac{\text{抗滑力矩}}{\text{滑动力矩}} = \frac{W \cos \alpha L_2}{P\left(\frac{1}{3}h_w + L \sin \alpha\right) + W \sin \alpha L_1} \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出, 崩塌体的稳定性和其底面的倾角、底面长度、重力平行底面和垂直底面分量到矩心的力臂及静水压力有关。当崩塌体后缘裂隙没有被水充填, 即 $P=0$ 时, $F = \frac{L_2}{L_1} \cot \alpha$, 这时

崩塌体的稳定性只和崩塌体底面的倾角及重力平行底面和垂直底面分量到矩心的力臂有关, 崩塌体重心越靠近临空面, 则崩塌体越不稳定。

2.3.2 倾倒型崩塌的致灾范围分析

假设土块脱离母岩瞬间为圆周运动与斜抛运动的临界状态(图 3)。假定 β 为坡形改变后的坡度, 斜坡总高度为 H , 倾倒体外部高度为 h , 同图 2。

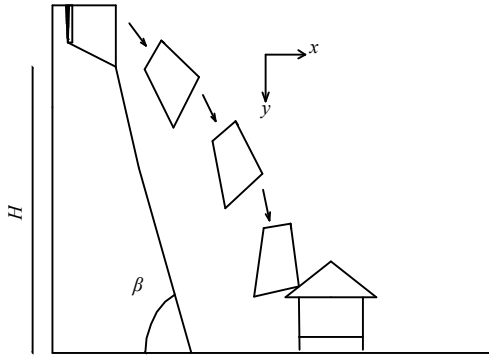


图 3 倾倒体的运动过程示意图
Fig.3 Sketch of the movement of the loess collapse with toppling style

当倾倒块体离开坡面时获得初始速度:

$$v = \sqrt{2gT \sin \alpha} \quad (12)$$

式中 T 为崩塌体离开坡面通过的距离。

倾倒体脱离母体飞落的轨迹方程为:

$$y = \tan \alpha \cdot x + \frac{\sec^2 \alpha}{2v^2} x^2 \cdot g \quad (13)$$

入射速度沿 x , y 轴的速度分量:

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{2gT \sin \alpha} \cos \beta \\ v_y = \sqrt{2gT \sin \alpha} \sin \beta \end{cases} \quad (14)$$

崩塌体飞落到地面所经过的时间为:

$$t_0 = \frac{\sqrt{v_y^2 + 2gH} - v_y}{g} - \frac{\sqrt{2gT \sin \alpha} \sin \beta}{g} \quad (15)$$

从而得到崩塌块体在水平地面静止时通过的距离为:

$$x = v_x \frac{\sqrt{v_y^2 + 2gH} - v_y}{g} + \frac{1}{2} g \left(\frac{\sqrt{v_y^2 + 2gH} - v_y}{g} \right)^2 - \frac{H}{\sec \beta} \quad (16)$$

2.3.3 工程实例

延安~绥德一级公路 K186+400 路基左侧黄土边坡高 20 m, 两级边坡, 第一级单级坡高 13 m, 单级坡率为 1:0.5, 顶部为 3 m 台阶。第二级单级坡高 7 m, 单级坡率 1.075。坡体土质含沙量大。岩性分为两层: 上层为 Q_3 黄土, 黏聚力 c 为 23 kPa, 内摩擦角 ϕ 为 19° , γ 为 18.3 kN/m^3 , 厚度 4 m。下层全部由 Q_2 黄土组成, c 为 25.5 kPa, ϕ 为 21° , γ 为 18.8 kN/m^3 。第一级边坡坡率较大, 在顶部平台边缘出现了张拉裂隙。图 4 为该边坡崩塌发生后的现状图。

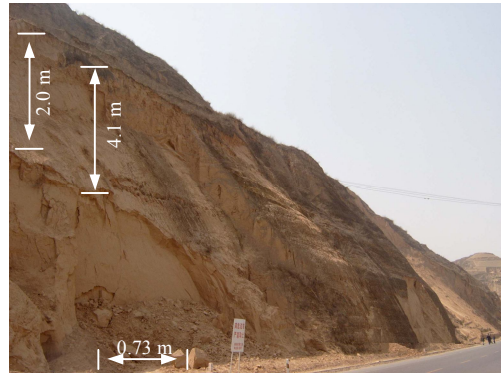


图 4 延安~绥德一级公路 K186+400 路基左侧黄土边坡倾倒式崩塌

Fig.4 Loess collapse with toppling style of the K186+400 left embankment of first-class highway that from Yan'an to Suide

由式 (7) 计算的裂隙最大深度 $h = \frac{2c}{\gamma} \tan \cdot$

$(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = 2.32 \text{ m}$, 由式 (4) 算的倾倒体前缘高度

$h = \frac{4c}{\gamma} \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = 4.64 \text{ m}$ 。破裂角 $\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} =$

54.5° , 从而得到崩塌块体底面长度 $L = 3.99 \text{ m}$ 。崩塌体的重量 $W = 6.78 \text{ kN/m}^2$ 。假定裂隙全部被水充填, 则水压力 $P = \gamma_w h = 2.32 \text{ kN/m}^2$ 。若崩塌体和母体裂隙贯通, 滑裂面的 $c \approx 0$, 崩塌体的力臂 $L_1 = 1.1 \text{ m}$, $L_2 = 1.7 \text{ m}$ 。由式 (11) 求得稳定系数 F 。

当后缘裂隙未充水时, $P = 0$

$$F = \frac{W \cos \alpha L_2}{W \sin \alpha L_1} = \cot \alpha \frac{L_2}{L_1} = 1.1 > 1 \quad (17)$$

当后缘裂隙完全充水时,

$$F = \frac{W \cos \alpha L_2}{P(\frac{1}{3} h_w + L \sin \alpha) + W \sin \alpha L_1} = \frac{6.78 \times 0.58 \times 1.7}{4.02 + 6.78 \times 1.1} = 0.55 < 1 \quad (18)$$

因此, 当后缘裂隙未充水时, 该倾倒体是稳定的; 当后缘裂隙完全充水后极不稳定, 将会以较高速度向下倾倒滚落。倾倒体脱离母体的初始速度 $v = \sqrt{2gT \sin \alpha} = 8.03 \text{ m/s}$, 脱离母体后的运动方程: $y = 1.12x^2 + 1.39x$ 。

入射速度沿 x , y 轴的速度分量:

$$\begin{cases} v_x = 3.65 \text{ m/s} \\ v_y = 7.15 \text{ m/s} \end{cases} \quad (19)$$

崩塌体飞落到地面所经

$$t_0 = \frac{\sqrt{v_y^2 + 2gH} - v_y}{g} - \frac{\sqrt{2gT \sin \alpha} \sin \beta}{g} = 2.44 \text{ s} \quad (20)$$

从而得到崩塌块体在水平地面静止时通过的距离为: $x = v_x t + \frac{1}{2} g t^2 - \frac{H}{\sec \beta} = 0.81 \text{ m}$, 即该倾倒地

体将会最远堆积在距离坡脚 0.81 m 处的位置。该公路坡底碎落台 1 m, 浆砌块石边沟厚 0.3 m, 边沟净宽 0.4 m, 则该倾倒地距公路路肩 1.19 m, 因此对公路构成的风险较小。但是崩塌体堆积在坡脚碎落台, 在水流的作用下进入边沟, 破坏了排水系统, 对公路构成了新的隐患, 因此对该倾倒地进行治理。

实际调查, 该倾倒地崩塌体堆积距离坡脚最远距离为 0.73 m, 小于理论计算的结果。理论计算的结果偏于保守。

2.3.4 讨论

实际上, 黄土崩塌块体拉裂的深度为 2 m, 临空面最大长度为 4.1 m, 和计算结果有差别, 这是由于黄土裂隙扩展的最大深度是根据满足静力许可的应力场的条件得出的, 倾倒体的最大高度是根据满足机动许可的应力场得出的, 而实际上, 土层结构、节理及强度指标的变异性较大, 受气温、湿度的变化以及降雨浸蚀等因素综合影响, 理论计算的结果和实际有一定的出入。但静力许可应力场求出极限荷载总是小于真正的极限荷载, 而由机动许可速度场求出的极限荷载总是大于真正的极限荷载, 因此理论计算得到的数值偏于保守, 即采用本文计算的结果偏于安全。

3 结 论

(1) 当黄土体土质均匀, 不受其他外在条件影响时, 黄土体在 $\frac{2c}{\gamma} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \leq h \leq \frac{4c}{\gamma} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ 的横断面范围内出现剪应力下降的“潜在层状面”。在张拉裂隙中产生的力矩的作用下, 黄土体沿着“潜在层状面”滑移。伴随着滑移的发展, 因下部受阻, 黄土体沿着临空面从坡脚开始从下至上作悬臂梁弯曲。当不同部位最大弯曲、弯折带部位相互贯通、并形成倾向坡外的断续的拉裂面时, 黄土体将沿该折断面发生蠕滑变形, 最终在重力作用下形成倾倒地崩塌。

(2) 根据倾倒地崩塌的形成特征, 分别由静力平衡条件的临界状态与塑性流动临界状态得到倾倒地崩塌裂隙长度的上、下限解, 根据摩尔库仑准则, 得到崩塌体底面产状。由以上结果确定倾倒地崩塌体的几何特征; 再根据力的平衡、力矩平衡条

件, 建立倾倒地黄土崩塌的稳定性判据, 实现对倾倒地黄土崩塌的稳定性评价。

(3) 根据发生倾倒地变形的条件, 建立了倾倒地崩塌体的运动学方程, 通过求解, 可再现倾倒地黄土崩塌发生后的运动轨迹, 确定崩塌体的致灾范围。研究结果揭示了倾倒地崩塌体的形成机制, 为确定倾倒地黄土崩塌治理方法提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 雷祥义, 魏青珂. 陕北伤亡性黄土崩塌成因与对策研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 64—69.
LEI Xiang-yi, WEI Qing-ke. Study on the origin and countermeasure of the casualty loess landfalls in the Northern Shaanxi[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 64—69.
- [2] 张茂省, 校培喜, 魏兴丽, 等. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [3] 孙建中, 赵景波. 黄土高原第四纪[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [4] HERLLER F, LIU Tung-sheng. Magnetism of Chinese loess deposits in China[J]. *Nature*, 1982, 431—433.
- [5] 胡厚田. 崩塌落石研究[J]. 铁道工程学报, 2005, 12(增刊): 388—391.
HU Hou-tian. Research on the collapse and falling stone[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2005, 12(Supp.): 388—391.
- [6] 崔政权, 李宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [7] 雷祥义. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京: 地质出版, 2001.
- [8] 徐茂其, 王昕, 罗守贵. 山地岩石斜坡崩塌类型及发育分期研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 28—32.
XU Mao-qi, WANG Xin, LUO Shou-gui. Approach to the types and stages of avalanches of mountainous rock slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(3): 28—32.
- [9] 曲永新, 张永双, 陈情来. 陕北晋西黄土滑塌灾害的初步研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 237—329.
QU Yong-xin, ZHANG Yong-shuang, CHEN Qing-lai. Preliminary study on loess slumping in the area between Northern Shaanxi and Western Shanxi[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(3): 237—329.