

ICS 93.080.01
R18

DB61

陕 西 省 地 方 标 准

DB 61/T 1027—2016

公路滚石灾害防治设计规范

Specification for rockfall disaster prevention design of road

2016 - 05 - 09 发布

2016 - 08 - 01 实施

陕西省质量技术监督局 发布

前 言

本标准根据GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中交第一公路勘察设计研究院有限公司提出。

本标准由陕西省交通运输厅归口。

本标准起草单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、西安中交土木科技有限公司、成都瑞可峰科技有限公司。

本标准主要起草人：彭泽友、何思明、翟敏刚、龙湛、吴永、施菁华、吴清、李新坡、杨安、苏凡。

本标准由中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责解释。

本标准首次发布。

联系信息如下：

单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

电话：029-88851152-2615

地址：陕西省西安市雁塔区科技四路205号

邮编：710075

公路滚石灾害防治设计规范

1 范围

本标准规定了公路滚石灾害防治的基本要求、灾害的识别、灾害的防治设计。

本标准适用于陕西省公路滚石灾害的识别、判定和防治设计。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 700 碳素结构钢

GB/T 706 热轧型钢

GB/T 8918 重要用途钢丝绳

GB 50021 岩土工程勘察规范

JTG C20 公路工程地质勘察规范

YB/T 5294 一般用途低碳钢丝

DB61/T 973 公路路堑边坡超前支护设计规范

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

滚石 rockfall

岩石块体失稳并以倾倒或坠落等方式滚落的一种地质现象。

3.1.2

滚石运动过程 rockfall movement

滚石从边坡或陡崖表面失稳分离后，在重力作用下经下落、回弹、跳跃、滚动或滑动等一种或几种组合运动方式沿着坡面向下快速运动，最后在较平缓的地带或障碍物附近停止下来的运动过程。

3.1.3

公路滚石灾害 rockfall disaster of road

滚石在运动过程中给公路工程设施或交通安全造成的灾害。

3.1.4

遥感技术 remote sensing technology

采用各种传感仪器对远距离目标所辐射和反射的电磁波信息进行收集、处理，并最后成像，从而实现地面各种物体或现象进行识别的一种综合技术。

3.1.5

遥感解译 remote sensing interpretation

根据遥感图像的几何特征和物理性质，识别物体或现象的质量和数量特征，测算某种指标的过程。

3.1.6

棚洞 rock shed

构筑的顶棚架并回填而成的结构。

3.1.7

主动防护网 active protecting net

覆盖于斜坡上，控制于不稳定岩石块体运动的钢丝绳等柔性防护网系统。

3.1.8

被动防护网 passive protecting net

安置于坡脚或坡体上，拦截滚石运动的钢丝绳等柔性防护网系统。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

a ——滚石重心至倾覆点的水平距离，单位为米 (m)；

a_{max} ——垫层材料的最大接触半径，单位为米 (m)；

a_y ——垫层开始屈服时的接触半径，单位为米 (m)；

CDI ——滚石灾害识别指数，表征滚石灾害发生的可能性；

c ——坡面覆盖土层的内聚力，单位为千帕 (kPa)；

D ——滚石与坡面的接触长度，单位为米 (m)；

E ——等效弹性模量，单位为千兆帕 (GPa)；

e ——主控结构面贯通段的垂直高度，单位为米 (m)；

e_n ——法向回弹系数；

e_t ——切向回弹系数；

e_1 ——主控结构面贯通段的垂直高度折减系数；

$(e_1)_n$ ——初始法向回弹系数；

$(e_1)_t$ ——初始切向回弹系数；

F ——坡面对滚石的摩擦力，单位为牛 (N)；

F_s ——滚石灾害体的稳定系数；

F_{i1} ——第 i 次碰撞坡面对滚石的冲击力，单位为牛 (N)；

f_{ik} ——滚石抗拉强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；

f_{0k} ——滚石与基座之间的抗拉强度标准值，当基座为岩体时 $f_{0k}=f_{ik}$ ；当基座为软质岩层如泥岩时取该软质岩石的抗拉强度标准值，单位为兆帕 (MPa)；

g ——重力加速度，单位为米每秒平方 (m/s^2)；

H ——滚石坠落的高度，单位为米 (m)；

H_i ——滚石坠落计算坡段的高度，单位为米 (m)；

h_{max} ——滚石垂直于边坡坡面的最大的弹跳高度，单位为米 (m)；

I ——滚石的惯性矩，单位为米的四次方 (mm^4)；

K	——运动阻力特征系数；
K_i	——第 i 坡段的运动阻力特征系数；
l	——滚石沿陡崖走向方向的长度，单位为米 (m)；
l_i	——第 i 次碰撞后滚石沿坡面运动距离，单位为米 (m)；
l_b	——底部主控结构面尖端至倾覆点的距离，单位为米 (m)；
N	——坡面对滚石的支撑力 (N)；
M	——滚石的质量，单位为千克 (kg)；
$M_{\text{倾覆}}$	——倾覆力矩，单位为牛米 (N·m)；
$M_{\text{抗倾}}$	——抗倾覆力矩，单位为牛 (N)；
P	——地震力，单位为牛 (N)；
P_e	——完全弹性条件下滚石的冲击力，单位为牛 (N)；
P_{ep}	——弹塑性条件下滚石的冲击力，单位为牛 (N)；
P_y	——垫层材料发生塑性变形的最小冲击力，单位为牛 (N)；
P_{max}	——滚石的最大冲击力，单位为牛 (N)；
P_{lim}	——滚石的极限冲击力，单位为牛 (N)；
Q	——裂隙水压力，单位为帕 (Pa)；
R	——滚石的半径，单位为米 (m)；
R_i	——第 i 个识别指标分级指数；
S	——滚石的位移，单位为米 (m)；
s_i	——第 i 次冲击后滚石沿坡面的运动距离，单位为米 (m)；
s''	——位移矢量对时间的二阶导数，即加速度，单位为米每秒平方 (m/s ²)；
t_i	——滚石第 i 次碰撞后经坡面回弹后在空中运动时间，单位为秒 (s)；
V	——滚石的运动速度，单位为米每秒 (m/s)；
V_c	——滚石在 C 点处的运动速度，单位为米每秒 (m/s)；
V_{cn}	——滚石在 C 点处入射速度的法向分量，单位为米每秒 (m/s)；
V_{cn}'	——滚石在 C 点处回弹速度的法向分量，单位为米每秒 (m/s)；
V_{ct}	——滚石在 C 点处入射速度的切向分量，单位为米每秒 (m/s)；
V_{ct}'	——滚石在 C 点处回弹速度的切向分量，单位为米每秒 (m/s)；
V_{cx}	——滚石在 C 点处 x 方向的运动速度，单位为米每秒 (m/s)；
V_{cx}'	——滚石在 C 点处回弹速度在 x 方向的分量，单位为米每秒 (m/s)；
V_{cy}	——滚石在 C 点处 y 方向的运动速度，单位为米每秒 (m/s)；
V_{cy}'	——滚石在 C 点处回弹速度在 y 方向的分量，单位为米每秒 (m/s)；
V_d	——滚石在 D 点处的运动速度，单位为米每秒 (m/s)；
$V_{f(t)}$	——滚石的最终速度，单位为米每秒 (m/s)；
V_i	——滚石第 i 次冲击坡面的速度，单位为米每秒 (m/s)；
V_i'	——滚石第 i 次冲击回弹的速度，单位为米每秒 (m/s)；
V_n	——滚石入射速度的法向分量，单位为米每秒 (m/s)；

- V_n' —— 滚石回弹速度的法向分量, 单位为米每秒(m/s);
 V_o —— 滚石在 O 点处的运动速度, 单位为米每秒(m/s);
 V_{ox} —— 滚石在 O 点处 x 方向的运动速度, 单位为米每秒(m/s);
 V_{oy} —— 滚石在 O 点处 y 方向的运动速度, 单位为米每秒(m/s);
 V_t —— 滚石入射速度的切向分量, 单位为米每秒(m/s);
 V_t' —— 滚石回弹速度的切向分量, 单位为米每秒(m/s);
 V_y —— 坡面土体初始屈服时滚石的法向冲击速度, 单位为米每秒(m/s);
 V_0 —— 滚石的初始速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_1)_n$ —— 滚石初始冲击入射时的法向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_1)_n'$ —— 滚石初始冲击回弹时的法向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_1)_t$ —— 滚石初始冲击入射时的切向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_1)_t'$ —— 滚石初始冲击回弹时的切向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_2)_n$ —— 滚石第二次冲击入射时的法向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_2)_t$ —— 滚石第二次冲击入射时的切向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_i)_n$ —— 滚石第 i 次冲击入射时的法向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_i)_n'$ —— 滚石第 i 次冲击回弹时的法向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_i)_t$ —— 滚石第 i 次冲击入射时的切向速度, 单位为米每秒(m/s);
 $(V_i)_t'$ —— 滚石第 i 次冲击回弹时的切向速度, 单位为米每秒(m/s);
 W —— 滚石的自重, 单位为牛(N);
 α —— 边坡的坡角, 单位为度($^\circ$);
 α_i —— 第 i 个计算坡段的坡角, 单位为度($^\circ$);
 β —— 岩体主控结构面倾角, 单位为度($^\circ$);
 β' —— 滚石反射速度的方向与纵坐标间的夹角, 单位为度($^\circ$);
 Δ —— 垫层的压缩量, 单位为米(m);
 δ_{\max} —— 垫层最大冲击压缩量, 单位为米(m);
 δ_y —— 垫层初始屈服时压缩量, 单位为米(m);
 ε —— 摩擦力特征系数;
 ε_i —— 第 i 个计算坡段的摩擦力特征系数;
 γ_w —— 水的重度, 取 9.81, 单位为千牛每立方米 (kN/m^3);
 φ —— 坡面覆盖土层的内摩擦角, 单位为度($^\circ$);
 λ_i —— 降雨条件下第 i 个识别指标的修正系数;
 μ —— 滑动摩擦系数, 可根据现场摩擦试验或经验取值;
 θ —— 碰撞切平面与 x 方向的夹角, 单位为度($^\circ$);
 θ_i —— 滚石第 i 次入射方向与坡面的夹角, 单位为度($^\circ$);
 ω_i —— 第 i 次冲击回弹后的角速度, 单位为米每秒(m/s);
 $\Delta\omega_i$ —— 第 i 次冲击时坡面冲击力作用下增加角速度, 单位为米每秒(m/s);

4 基本要求

4.1 一般规定

4.1.1 公路滚石灾害的防治设计，应遵循有效性、经济性、系统性、综合防治和保护环境的原则。

4.1.2 公路滚石灾害防治工作的流程如下：

- a) 滚石灾害遥感识别；
- b) 滚石灾害局部识别；
- c) 滚石灾害体稳定性分析；
- d) 滚石运动过程分析；
- e) 滚石冲击力计算；
- f) 防治工程的选取和设计。

4.1.3 公路滚石灾害防治设计前应进行工程地质勘察，具体参照 JTG C20 的规定执行。

4.1.4 对于稳定性受主控结构面控制的危岩体，公路滚石灾害分析时应查明岩体的结构面特征，包括：

- a) 结构面的特性：壁面的起伏程度、张开程度和充填特征等；
- b) 结构面倾向与斜坡临空面倾向的方位关系；
- c) 多组结构面的空间组合分布特性。

4.1.5 对于软硬互层岩体，公路滚石灾害分析时应考虑硬岩底部软岩的强度。

4.2 公路滚石灾害的分类

4.2.1 根据离开母岩的方式可将公路滚石灾害分为倾倒式、滑移式和坠落式三种类型，分类方法按表 1 的规定执行。

表 1 滚石灾害分类表

类型	特征描述
倾倒式	滚石灾害体转动倾倒塌落
滑移式	滚石灾害体沿软弱面滑移，在陡崖(坡)处滑落
坠落式	悬空或悬挑式岩块拉断、切断塌落

5 公路滚石灾害的识别

5.1 一般规定

5.1.1 公路滚石灾害识别应遵循从宏观到微观，从区域到局部的原则。

5.1.2 公路滚石灾害宏观区域性识别时可采用遥感解译技术，提取滚石灾害体的特征信息。

5.1.3 公路滚石灾害局部识别时应以现场地质调查为基础，根据滚石灾害体的特征进行识别，必要时可辅以三维激光扫描获取灾害体的微观特征。

5.2 滚石灾害宏观区域性遥感识别

5.2.1 应根据滚石灾害体的遥感解译标志，圈定滚石灾害体发育的地点、范围，并根据地质、气候等条件推测滚石灾害的频度和规模。

5.2.2 对于遥感识别圈定的可能发育滚石灾害体的边坡应进行外业调查验证，调查方法按 GB 50021 的规定执行，典型滚石灾害体验证点不宜少于 3 个。

5.2.3 应根据遥感解译和验证结果编制滚石灾害体分布图，分布图上应标明灾害体的分布范围。

5.3 滚石灾害局部识别

5.3.1 公路滚石灾害局部识别工作流程如下：

- a) 危岩体现场地质条件调查；
- b) 滚石识别指标体系建立；
- c) 识别指标赋值；
- d) 滚石灾害定量识别。

5.3.2 公路滚石灾害识别时选取斜坡坡度、岩体主控结构面倾角、结构面发育情况、坡面起伏特征、岩性及组合特征和岩体完整性作为识别指标。

5.3.3 滚石灾害识别指标赋值时可采用半定量专家取值法，赋值方法按附录 A 的规定执行。

5.3.4 滚石灾害的识别指数按公式（1）计算。

$$CDI = 27.16R_1 + 18.08R_2 + 17.69\lambda_3R_3 + 10.28R_4 + 7.26R_5 + 3.85\lambda_6R_6 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

R_i ——根据附录A的规定取值；

λ_j ——根据表2的规定取值。

表 2 降雨条件下识别指标的修正系数 λ_j

修正系数	修正系数取值	识别指标状况描述
λ_3	1.5	岩体结构松散，结构面张开程度大、有大量的泥质充填
	1.2	结构面明显张开、贯通性好，控制性结构面局部充填
	1	结构面多闭合、无充填
λ_6	1.5	岩体破碎、极破碎(岩体呈镶嵌、碎裂结构)
	1.2	岩体较完整(岩体呈次块状、薄层状结构)
	1	岩体完整(岩体呈块状，厚层、中厚层状结构)

5.3.5 根据识别指数可将公路滚石灾害等级分为三级，分级标准按表 3 的规定执行。

表3 公路滚石灾害等级划分表

等级	识别指数 CDI	定性描述
I	>140	易发生大范围滚石灾害
II	$90\sim 140$	易发生局部滚石灾害
III	<90	易发生单个滚石坠落

5.4 滚石灾害体的稳定性评价

5.4.1 滚石灾害体稳定性评价分为定性评价、半定量评价和定量评价三种，区域性滚石灾害评价宜采用定性评价方法，局部滚石灾害评价宜采用半定量评价和定量评价方法。

5.4.2 滚石灾害体稳定性状态定性评价应综合考虑其发育的边界条件、主控结构面发育特征、新近变形破坏迹象等因素，根据野外判据可将滚石灾害体分为不稳定、基本稳定和稳定三个状态，评价准则按附录A的规定执行。

5.4.3 滚石灾害体稳定性状态半定量评价时可采用赤平投影法，分析岩体主控结构面与边坡临空面的空间关系，评价依据按表4规定执行，评价方法按DB61/T 973的规定执行。

表4 滚石灾害体稳定性赤平投影法评价依据

失稳方式	β 范围	α 、 β 、 φ 三者关系
滑移式	$\leq 60^\circ$	主控结构面与边坡临空面走向、倾向一致，满足 $\varphi \leq \beta \leq \alpha$ 。
倾倒式	$\geq 30^\circ$	主控结构面与边坡临空面倾向相反，且两者夹角 $\geq 120^\circ$ ，破坏区域一般为 $(120^\circ - \alpha) \sim 90^\circ$ 。
坠落式	$\geq 65^\circ$	沿控制结构面组中的一条结构面发生破坏，并满足 $\varphi \leq \beta \leq \alpha$ 。

注： α 为边坡临空面倾角； β 为岩体主控结构面倾角； φ 为结构面内摩擦角。

5.4.4 滚石灾害体稳定性的定量评价应按附录C的规定执行。

6 公路滚石灾害的防治设计

6.1 一般原则

6.1.1 公路滚石灾害防治设计应在滚石灾害的识别和稳定性评价的基础上进行，选择合适的防治措施。

6.1.2 公路滚石灾害防治设计应注重滚石的运动特征分析。

6.1.3 公路滚石灾害防治工程主要包括棚洞防治工程和防护网防治工程等。

6.2 滚石的坡面运动过程和冲击力计算

6.2.1 滚石沿坡面的运动过程计算按附录D的规定执行。

6.2.2 滚石的冲击力计算按附录E的规定执行。

6.3 棚洞防治工程

6.3.1 棚洞设置时应顺应地形，同时满足防治滚石灾害和保护自然环境的要求。

6.3.2 棚洞设置时可采用锚喷支护与棚洞结构相组合的傍山隧道结构形式。

6.3.3 棚洞设计应避免由于大开挖引起的各类边坡灾害。

- 6.3.4 应按照滚石运动过程和冲击力计算结果，根据相关规范对棚洞结构进行设计。
- 6.3.5 棚洞设计方案应采用数值模拟和荷载方法进行对比验算。
- 6.3.6 棚洞设计时应考虑防排水措施，棚洞内、外应形成完整的防排水系统。

6.4 防护网防治工程

- 6.4.1 防护网防治滚石灾害的基本方式包括覆盖和拦截两种，按作用方式的不同可将其分为主动防护网和被动防护网两类。
- 6.4.2 防护网的类型和设置方式应根据危岩体的地形特征、分布特征和稳定性条件选定。
- 6.4.3 防护网主要采用金属柔性网，包括钢丝绳网、钢丝格栅和环形网。
- 钢丝绳网采用钢丝绳编制，并在交叉结点处用专用“十”字卡扣固定；
 - 钢丝格栅的钢丝不应有明显的机械损伤和锈蚀现象。高强度钢丝格栅端头应至少扭结一次，扭结处不应有裂纹；
 - 环形网的单个网环应由单根钢丝盘结而成，两端头间搭接长度不应小于 100mm；除边缘环孔外，每环应与其周边的 4 个临环相扣联。
- 6.4.4 防护网原材料选择时的技术要求应满足表 5 的规定。

表 5 防护网原材料的技术要求

材料用途	原材料	技术要求
钢丝绳	钢丝	应符合 GB/T 8918 的规定，强度不宜低于 1770MPa。
钢丝格栅	钢丝	应符合 YB/T 5294 的规定。
环形网	钢丝	
钢柱	钢材	应符合 GB/T 700 和 GB/T 706 的规定。
注：防护网原材料均应进行热镀锌或锌铝合金镀层处理。		

6.5 其他防治工程

- 6.5.1 根据滚石灾害的具体环境，可选用拦石墙、支顶、锚喷支护等工程措施。
- 6.5.2 拦石墙设置在滚石运动路径上，墙背处宜回填砂砾等缓冲材料，拦石墙的结构尺寸应根据滚石冲击力的大小进行设计。
- 6.5.3 支顶主要用于加固大块危岩凸起体和悬倒体，采用支顶加固时应保证基础的稳定性。
- 6.5.4 对于局部不稳定的危岩体可采用锚喷支护进行局部加固；对于膨胀性岩质和具有严重腐蚀性的边坡不宜采用锚喷支护。

附 录 A
(规范性附录)
滚石灾害体稳定性的定性评价依据

A.1 滚石灾害体稳定性的定性评价依据

滚石灾害体稳定性的定性评价依据见表A.1。

表 A.1 滚石灾害体稳定性的定性评价依据

失稳模式	滚石灾害体稳定性		
	不稳定	基本稳定	稳定
滑移式	边界条件清晰； 发育缓倾坡外结构面； 结构面张开或为软弱结构面，且基本贯通； 变形破坏迹象明显。	边界条件较清晰； 发育缓倾坡外结构面； 结构面闭合但连通率较高； 有变形破坏现象。	边界条件不清晰； 倾坡外结构面闭合； 结构面连通率不高； 变形破坏现象较轻，无新近变形破坏迹象。
倾倒式	边界条件清晰； 后缘陡倾裂隙发育，根部裂隙发育或发育缓倾坡外结构面； 主控结构面基本贯通，后缘裂隙基本张开； 变性破坏迹象明显，岩体有向坡外移动趋势，周围有新的变形破坏迹象。	边界条件较清晰； 后缘陡倾裂隙发育，根部有裂纹或发育缓倾坡外结构面； 主控结构面尚未贯通，后缘裂隙局部张开，滚石体重心尚在原位； 有一定的变形破坏迹象。	边界条件不清晰； 后缘发育有陡倾闭合裂隙，根部尚未发育明显裂隙或缓倾坡外结构面； 主控结构面连通率较低，滚石体重心尚在原位； 变形破坏现象较轻，无新近变形破坏迹象。
坠落式	边界条件清晰； 后缘发育有陡倾张开裂隙； 结构面基本贯通； 变性破坏迹象明显，岩体周围有新的变性破坏迹象。	边界条件较清晰； 后缘发育有陡倾闭合裂隙； 主控结构面连通率较高，且局部张开； 新近变形破坏迹象不明显。	边界条件不清晰； 后缘陡倾裂隙不发育； 主控结构面连通率较低； 无新近变形破坏迹象。

附 录 B
(规范性附录)

滚石灾害识别指标半定量专家取值法

B.1 滚石灾害识别指标半定量专家取值法

各识别指标应按表B.1~B.6的规定进行取值，其中取值为0代表该识别指标对于滚石灾害发生概率的贡献很小，1代表有贡献，2代表贡献很大。

表 B.1 斜坡坡度 R1

序号	取值	取值准则
1	0	坡度 $\leq 30^\circ$
2	1	$30^\circ < \text{坡度} < 60^\circ$
3	2	坡度 $\geq 60^\circ$

表 B.2 岩体主控结构面倾角 R2

序号	取值	取值准则
1	0	倾角 $\leq 25^\circ$
2	1	$25^\circ < \text{倾角} < 65^\circ$
3	2	倾角 $\geq 65^\circ$

表 B.3 结构面发育情况 R3

序号	取值	取值准则
1	0	闭合或微张、无充填、不贯通
2	1	张开约 1cm~5cm，局部夹泥
3	2	张开 $> 5\text{cm}$ 、夹泥严重、贯通好

表 B.4 坡面起伏特征 R4

序号	取值	取值准则
1	0	平均深度 $< 0.5\text{m}$ ，规模较小
2	1	深度约 0.5m~1m，规模中等
3	2	平均深度 $> 1\text{m}$ ，规模较大

表 B.5 岩性及组合特征 R5

序号	取值	取值准则
1	0	主体为硬质岩
2	1	中硬岩、软硬互层岩体
3	2	软岩、有软弱夹层的岩体

表 B.6 岩体完整性 R6

序号	取值	取值准则
1	0	岩体完整，呈块状、厚层、中厚层状
2	1	岩体较完整，呈次块状、薄层状、镶嵌结构
3	2	岩体破碎、极破碎，呈镶嵌、碎裂结构

附录 C

(规范性附录)

滚石灾害体稳定性的定量评价方法

C.1 滑移式滚石稳定性计算方法

C.1.1 天然状态下的稳定性计算

滑移式滚石考虑自重+裂隙水压力(天然状态)时取 $e_1=e/3$, 此时地震力 $P=0$, 裂隙水压力和滚石稳定系数分别按公式 (C.1) 和公式 (C.2) 计算:

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w e_1^2 l = \frac{1}{18} \gamma_w e^2 l \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

$$F_s = \frac{(W \cos \beta - P \sin \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta + P \cos \beta} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

$$= \frac{(W \cos \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta}$$

C.1.2 暴雨状态下的稳定性计算

滑移式滚石考虑自重+裂隙水压力(暴雨状态)时取 $e_1=2e/3$, 此时地震力 $P=0$, 裂隙水压力和滚石稳定系数分别按公式 (C.3) 和公式 (C.4) 计算:

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w e_1^2 l = \frac{2}{9} \gamma_w e^2 l \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

$$F_s = \frac{(W \cos \beta - P \sin \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta + P \cos \beta} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

$$= \frac{(W \cos \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta}$$

C.1.3 地震力作用下的稳定性计算

滑移式滚石考虑自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力时取 $e_1=e/3$, 此时地震力 $P \neq 0$, 裂隙水压力与稳定系数分别按公式 (C.5) 和公式 (C.6) 计算:

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w e_1^2 l = \frac{1}{18} \gamma_w e^2 l \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

$$F_s = \frac{(W \cos \beta - P \sin \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta + P \cos \beta} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

C.2 倾倒式滚石稳定性计算

C.2.1 滚石重心在倾覆点内侧时的稳定性计算

C.2.1.1 滚石重心在倾覆点内侧时，倾覆力矩的计算见公式 (C.7)，抗倾覆力矩的计算见公式 (C.8)，稳定系数的计算见公式 (C.9)。

$$M_{\text{倾覆}} = Ph_0 + Q\left(\frac{e_1}{3\sin\beta} + \frac{H-e}{\sin\beta}\right) \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

$$M_{\text{抗倾}} = Wa + f_{lk} \frac{H-e}{\sin\beta} + l_b f_{0k} \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

$$F_s = \frac{M_{\text{倾覆}}}{M_{\text{抗倾}}} = \frac{Wa + f_{lk} \frac{H-e}{\sin\beta} + l_b f_{0k}}{Ph + Q\left(\frac{e_1}{3\sin\beta} + \frac{H-e}{\sin\beta}\right)} \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

C.2.1.2 暴雨状态下的稳定性计算。倾倒式滚石考虑自重+裂隙水压力(暴雨状态)时取 $e_1=2e/3$ ，此时地震力 $P=0$ ，裂隙水压力与稳定系数分别按公式 (C.10) 和公式 (C.11) 计算。

$$Q = \frac{1}{2}\gamma_w e_1^2 l = \frac{2}{9}\gamma_w e^2 l \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

$$\begin{aligned} F_s &= \frac{M_{\text{倾覆}}}{M_{\text{抗倾}}} = \frac{Wa + f_{lk} \frac{H-e}{\sin\beta} + l_b f_{0k}}{Ph + Q\left(\frac{e_1}{3\sin\beta} + \frac{H-e}{\sin\beta}\right)} \\ &= \frac{Wa + f_{lk} \frac{H-e}{\sin\beta} + l_b f_{0k}}{\frac{2}{9}\gamma_w e^2 l \left(\frac{2e_1}{9\sin\beta} + \frac{H-e}{\sin\beta}\right)} \\ &= \frac{81[(Wa + f_{0k}l_b)\sin\beta + f_{lk}(H-e)]}{2(9H-7e)\gamma_w e^2 l} \quad \dots\dots\dots (C.11) \end{aligned}$$

C.2.1.3 地震力作用下的稳定性计算。滑移式滚石考虑自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力时取 $e_1=e/3$ ，此时裂隙水压力和地震力($P \neq 0$)均为可变荷载，裂隙水压力与稳定系数分别按公式 (C.12) 和公式 (C.13) 计算。

$$Q = \frac{1}{2}\gamma_w e_1^2 l = \frac{1}{18}\gamma_w e^2 l \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

$$F_s = \frac{M_{\text{倾覆}}}{M_{\text{抗倾}}} = \frac{Wa + f_{lk} \frac{H-e}{\sin\beta} + l_b f_{0k}}{Ph + Q\left(\frac{e_1}{3\sin\beta} + \frac{H-e}{\sin\beta}\right)}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{Wa + f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{0k}}{Ph + \frac{1}{18} \gamma_w e^2 l \left(\frac{e}{9 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)} \dots\dots\dots (C. 13) \\
 &= \frac{162 [(Wa + f_{0k} l_b) \sin \beta + f_{lk} (H-e)]}{162 Ph \sin \beta + (9H - 8e) \gamma_w e^2 l}
 \end{aligned}$$

C. 2. 2 滚石重心在倾覆点外侧时的稳定性计算

C. 2. 2. 1 滚石重心在倾覆点外侧时，倾覆力矩的计算见公式 (C. 14)，抗倾覆力矩的计算见公式 (C. 15)，稳定系数的计算见公式 (C. 16)。

$$M_{\text{倾覆}} = Wa + Ph + Q \left(\frac{e_1}{3 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right) \dots\dots\dots (C. 14)$$

$$M_{\text{抗倾}} = f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{0k} \dots\dots\dots (C. 15)$$

$$F_s = \frac{M_{\text{倾覆}}}{M_{\text{抗倾}}} = \frac{f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{0k}}{Wa + Ph + Q \left(\frac{e_1}{3 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)} \dots\dots\dots (C. 16)$$

C. 2. 2. 2 暴雨状态下的稳定性计算。倾倒式滚石考虑自重+裂隙水压力(暴雨状态)时取 $e_1=2e/3$ ，此时地震力 $P=0$ ，裂隙水压力与稳定系数分别按公式 (C. 17) 和公式 (C. 18) 计算。

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w e_1^2 l = \frac{2}{9} \gamma_w e^2 l \dots\dots\dots (C. 17)$$

$$\begin{aligned}
 F_s = \frac{M_{\text{倾覆}}}{M_{\text{抗倾}}} &= \frac{f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{0k}}{Wa + Ph + Q \left(\frac{e_1}{3 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)} \\
 &= \frac{f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{0k}}{Wa + \frac{2}{9} \gamma_w e^2 l \left(\frac{2e}{9 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)} \dots\dots\dots (C. 18) \\
 &= \frac{81 [l_b f_{0k} \sin \beta + f_{lk} (H-e)]}{81 Wa \sin \beta + 2(9H - 7e) \gamma_w e^2 l}
 \end{aligned}$$

C. 2. 2. 3 地震力作用下的稳定性计算。滑移式滚石考虑自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力时取 $e_1=e/3$ ，此时裂隙水压力和地震力($P \neq 0$)均为可变荷载，裂隙水压力与稳定系数分别按公式 (C. 19) 和公式 (C. 20) 计算

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w e_1^2 l = \frac{1}{18} \gamma_w e^2 l \dots\dots\dots (C. 19)$$

$$\begin{aligned}
 F_s &= \frac{M_{\text{倾覆}}}{M_{\text{抗倾}}} = \frac{f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{0k}}{Wa + Ph + Q \left(\frac{e_1}{3 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)} \\
 &= \frac{f_{lk} \frac{H-e}{\sin \beta} + l_b f_{0k}}{Wa + Ph + \frac{1}{18} \gamma_w e^2 l \left(\frac{e}{9 \sin \beta} + \frac{H-e}{\sin \beta} \right)} \dots\dots\dots (C. 20) \\
 &= \frac{162 [l_b f_{0k} \sin \beta + f_{lk} (H-e)]}{162 \sin \beta (Wa + Ph) + (9H - 8e) \gamma_w e^2 l}
 \end{aligned}$$

C. 2. 3 坠落式滚石稳定性计算

C. 2. 3. 1 天然状态下的稳定性计算

坠落式滚石考虑自重+裂隙水压力(天然状态)时地震力 $P=0$ ，滚石稳定系数按公式 (C. 21) 计算。

$$\begin{aligned}
 F_s &= \frac{(W \cos \beta - P \sin \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta + P \cos \beta} \\
 &= \frac{W \cos \beta \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta} \dots\dots\dots (C. 21)
 \end{aligned}$$

C. 2. 3. 2 地震力作用下的稳定性计算

坠落式滚石考虑自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力时 $P \neq 0$ ，滚石稳定系数按公式 (C. 22) 计算。

$$F_s = \frac{(W \cos \beta - P \sin \beta) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta + P \cos \beta} \dots\dots\dots (C. 22)$$

附录 D
(规范性附录)
滚石坡面运动过程计算方法

D.1 经验计算方法

D.1.1 单一坡度的边坡

对于各台阶高度均小于5m的台阶式边坡和各段长度小于10m或相邻坡度差小于5°的折线边坡（如图 D.1），滚石的运动速度应按公式（D.1）、公式（D.2）和公式（D.3）计算。

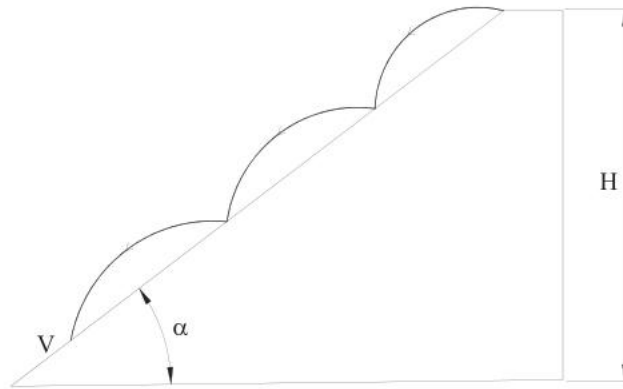


图 D.1 单一坡度的边坡计算示意图

$$V = \mu\sqrt{2gH} = \varepsilon\sqrt{H} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

$$\mu = \sqrt{1 - K \cot \alpha} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

$$\varepsilon = \mu\sqrt{2g} \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

表 D.1 阻力特征系数 K 值计算公示表 (据胡厚田等, 1989)

编号	边坡坡度角(α)	K 值计算公式
1	0° ~30°	$K=0.41+0.0043\alpha$
2	30° ~60°	$K=0.543-0.0048\alpha+0.000162\alpha^2$
3	60° ~90°	$K=1.05-0.0125\alpha+0.0000025\alpha^3$

D.1.2 I型折线型边坡

对于缓坡段坡角 $\alpha < 30^\circ$ ，陡坡段坡角 $\alpha \leq 60^\circ$ ，坡段长度超过10m，相邻坡段坡角相差大于 5° 的边坡（图D.2），滚石的运动速度应按公式（D.4）计算。

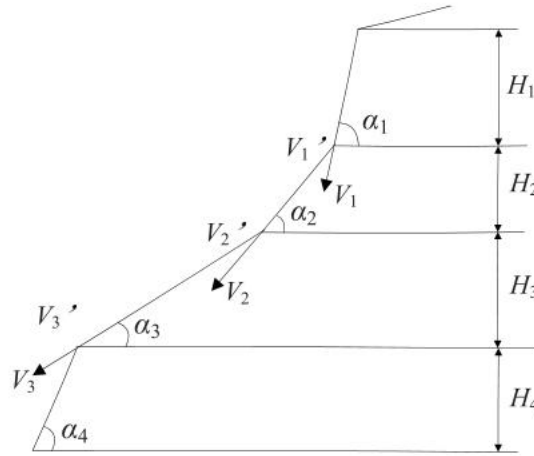


图 D.2 I 型折线型边坡计算示意图

$$V_{f(i)} = \sqrt{V_i^2 + 2gH_i(1 - K_i \cot \alpha_i)} = \sqrt{V_0^2 + \varepsilon_i^2 H_i} \dots\dots\dots (D.4)$$

D.1.3 II型折线型边坡

D.1.3.1 对于高度超过10m，下部坡段坡度较缓而上部坡段陡峻（坡度 $\alpha > 60^\circ$ ）的边坡（图D.3），滚石自陡坡上坠落至第一段坡脚时的速度按公式（D.5）计算。

D.1.3.2 滚石自坡脚向前运动时切线方向分速度按公式（D.6）计算。

D.1.3.3 滚石运动至较缓坡末端处的速度按公式（D.7）计算。

D.1.3.4 滚石运动轨迹方程见公式（D.8）和公式（D.9）。滚石垂直于边坡坡面的最大的弹跳高度按公式（D.10）计算。

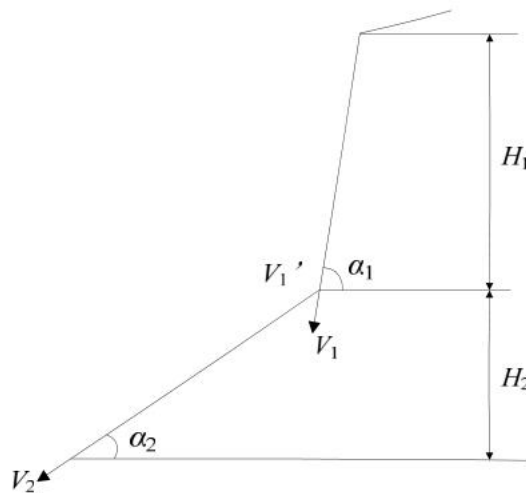


图 D.3 II 型折线型边坡计算示意图

$$V_1 = \varepsilon_1 \sqrt{H_1} \dots\dots\dots (D. 5)$$

$$(V_1)'_t = (1 - \mu)V'_t \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \dots\dots\dots (D. 6)$$

$$V_2 = \sqrt{(V_1)'_t^2 + \varepsilon_2^2 H_2} \dots\dots\dots (D. 7)$$

$$y = \frac{gx^2}{2V_0^2 \sin^2 \beta'} + x \cot \beta' \dots\dots\dots (D. 8)$$

$$\beta' = \frac{200 + 2\alpha_1(1 - \frac{\alpha_1}{45})}{\sqrt[3]{V_0}} \dots\dots\dots (D. 9)$$

$$h_{\max} = \frac{V_0^2 (\tan \alpha_1 - \cot \beta')^2}{2g(1 + \cot^2 \beta')} \dots\dots\dots (D. 10)$$

D. 2 运动学计算方法

D. 2.1 假设

对于边坡滚石运动问题，作以下简化假设：

- a) 假设滚石运动为二维运动，不考虑滚石之间的相互影响；
- b) 假定边坡坡面形状已知，坡面方程为 $E(x, y)=0$ ；
- c) 将滚石视为质量均匀分布的球体，二维坐标下简化为圆，滚石绕其圆心转动。

D. 2.2 滚石的滑动

D. 2.2.1 滚石滑动结束时的速度按公式 (D. 11) 计算。

D. 2.2.2 滚石总滑动距离按公式 (D. 12) 计算。

$$V = \sqrt{V_0^2 - 2gs(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)} \dots\dots\dots (D. 11)$$

$$s = \frac{V_0^2 - V^2}{2g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)} \dots\dots\dots (D. 12)$$

D. 2.3 滚石的自由飞落

D. 2.3.1 滚石的自由飞落模型如图D. 4所示。

D. 2.3.2 在 $t=t_0$ 时刻，滚石位于图中 $O(x_0, y_0)$ 点，速度为 V_0 。则在 $t=t_0+\Delta t$ 时刻，滚石的坐标 (x, y) 见公式 (D. 13) 和公式 (D. 14)。

D. 2.3.3 滚石自由飞落的运动轨迹方程见公式 (D. 15)。

D. 2.3.4 边坡剖面方程见公式 (D. 16)。

D. 2.3.5 碰撞点C处滚石的入射速度见公式 (D. 17)。

D. 2.3.6 假设防护工程设置在边坡坡面上的 $D(x_d, y_d)$ 点，则在防护工程位置滚石的撞击高度和速度见公式 (D. 18) 和公式 (D. 19)。

$$x = V_{ox} \Delta t + x_0 \dots\dots\dots (D. 13)$$

$$y = -\frac{1}{2} g \Delta t^2 - V_{oy} \Delta t + y_0 \dots\dots\dots (D. 14)$$

$$\frac{2V_{ox}^2}{g} (y - y_0) + (x - x_0)^2 + \frac{2V_{ox} V_{oy}}{g} (x - x_0) = 0 \dots\dots\dots (D. 15)$$

$$f(x, y) = 0 \dots\dots\dots (D. 16)$$

$$V_c = \sqrt{V_{ox}^2 + (V_{oy} + g \frac{x_c - x_0}{V_{ox}})^2} \dots\dots\dots (D. 17)$$

$$h = -\frac{1}{2} g (\frac{x_d - x_0}{V_{ox}})^2 - V_{oy} (\frac{x_d - x_0}{V_{ox}}) \dots\dots\dots (D. 18)$$

$$V_d = \sqrt{V_{ox}^2 + (V_{oy} + g \frac{x_d - x_0}{V_{ox}})^2} \dots\dots\dots (D. 19)$$

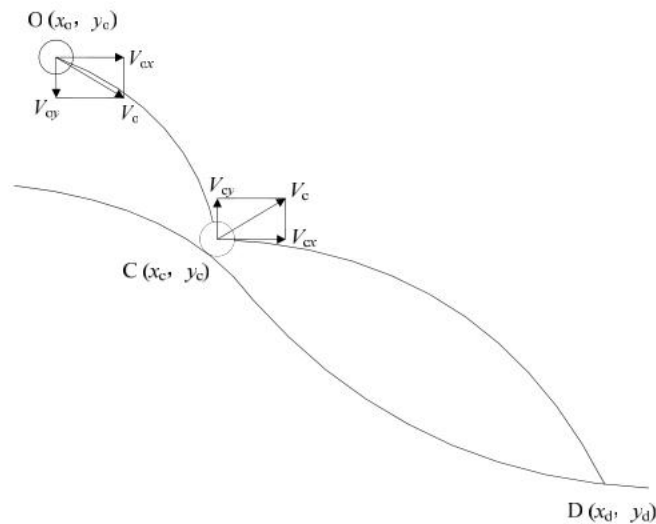


图 D. 4 滚石自由飞落模型

D. 2. 4 滚石的碰撞弹跳。

D. 2. 4. 1 滚石的碰撞弹跳模型如图D. 5所示。

D. 2. 4. 2 采用恢复系数法来分析滚石碰撞时，其法向和切向恢复系数见公式 (D. 20) 和公式 (D. 21)。

D. 2. 4. 3 速度矢量分解式见 (D. 22) 和公式 (D. 23)。

D. 2. 4. 4 碰撞切平面和x轴的夹角计算，见公式 (D. 24)。

D. 2. 4. 5 碰撞后滚石速度的水平、竖直分量及合速度见公式 (D. 25)，公式 (D. 26)，和公式 (D. 27)。

D. 2. 4. 6 滚石碰撞的法向恢复系数在0.2~0.5之间，切向恢复系数在0.4~0.9之间。当边坡坡面有基岩出露时，取大值；坡面无植被覆盖或有少量植被覆盖的砾岩或硬土时，取中间值；坡面为松散残积土或粘土时，取小值。表D. 2和D. 3为唐红梅等推荐的法向和切向恢复系数的取值。

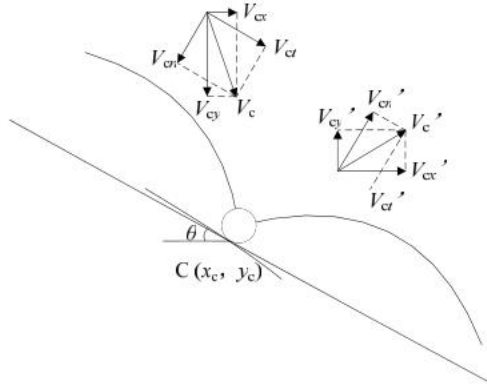


图 D. 5 滚石的碰撞弹跳模型

$$e_n = \frac{V'_n}{V_n} \dots\dots\dots (D. 20)$$

$$e_t = \frac{V'_t}{V_t} \dots\dots\dots (D. 21)$$

$$\begin{cases} V_{ct} = V_{cx} \cos \theta + V_{cy} \sin \theta \\ V_{cn} = -V_{cx} \sin \theta + V_{cy} \cos \theta \end{cases} \dots\dots\dots (D. 22)$$

$$\begin{cases} V'_{ct} = V'_{cx} \cos \theta + V'_{cy} \sin \theta \\ V'_{cn} = -V'_{cx} \sin \theta + V'_{cy} \cos \theta \end{cases} \dots\dots\dots (D. 23)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\left| \frac{f'_x}{f'_y} \right|_{(x_c, y_c)} \right), \text{ 其中 } f'_x = \frac{\partial f}{\partial x}, f'_y = \frac{\partial f}{\partial y} \dots\dots\dots (D. 24)$$

$$V'_{cx} = e_t(V_{cx} \cos \theta + V_{cy} \sin \theta) \cos \theta - e_n(-V_{cx} \sin \theta + V_{cy} \cos \theta) \sin \theta \dots\dots\dots (D. 25)$$

$$V'_{cy} = e_t(V_{cx} \cos \theta + V_{cy} \sin \theta) \sin \theta + e_n(-V_{cx} \sin \theta + V_{cy} \cos \theta) \cos \theta \dots\dots\dots (D. 26)$$

$$V'_c = \sqrt{V'^2_{cx} + V'^2_{cy}} \dots\dots\dots (D. 27)$$

表 D.2 法向恢复系数(据唐红梅等, 2003)

坡面特征	法向恢复系数(R_n)
光滑而坚硬的表面和铺砌面, 如人行道或光滑的基岩面	0.37~0.42
多数为基岩和砾岩区的斜面	0.33~0.37
硬土边坡	0.30~0.33
软土边坡	0.28~0.30

表 D.3 切向恢复系数(据唐红梅等, 2003)

坡面特征	切向恢复系数(R_t)
光滑而坚硬的表面和铺砌面, 如人行道或光滑的基岩面	0.87~0.92
多数为基岩和物质被覆盖的边坡	0.83~0.87
多数为有少量植被的边坡	0.82~0.85
植被覆盖的边坡和有稀少植被覆盖的土质边坡	0.80~0.83
灌木林覆盖的土质边坡	0.78~0.82

D.2.5 滚石的滚动

D.2.5.1 滚石的滚动模型如图D.6, 假设滚石在O点进入滚动状态, 任意时刻t时, 平衡方程见公式(D.28)、公式(D.29)和公式(D.30)。

D.2.5.2 通过公式(D.28)、公式(D.29)和公式(D.30)计算加速度公式见(D.31)和公式(D.32)。

D.2.5.3 任意位置s处的速度见公式(D.33)。

D.2.5.4 当 $s'' < 0$, 即 $\tan \alpha < \tan \beta$ 时, 滚石作减速滚动, 其停止时的位移s见公式(D.34)。

D.2.5.5 公式(D.28)~公式(D.34)可用来计算滚石的影响范围。

$$N - mg \cos \alpha = 0 \quad \dots\dots\dots (D.28)$$

$$ms'' = mg \sin \alpha - f \quad \dots\dots\dots (D.29)$$

$$I \frac{s''}{R} = fR - Nd \quad \dots\dots\dots (D.30)$$

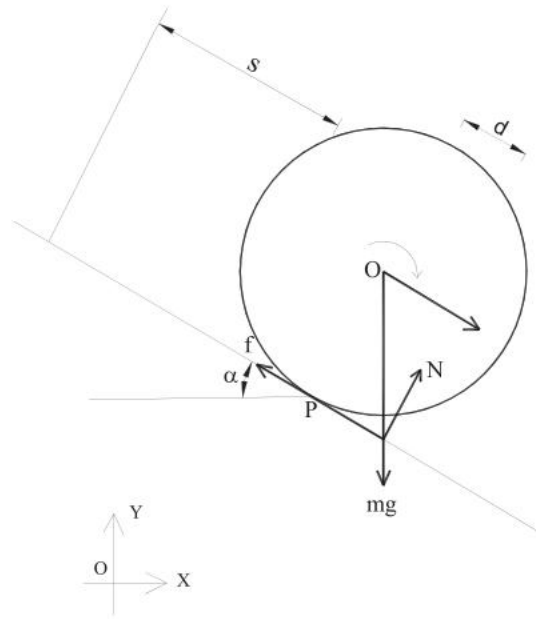


图 D.6 滚石滚动模型

$$s'' = \frac{mg}{m + \frac{I}{R^2}} (\sin \alpha - \frac{d}{R} \cos \alpha) \dots\dots\dots (D. 31)$$

$$s'' = Bg \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \beta_r), \text{ 其中 } B = \frac{m}{m + \frac{I}{R^2}}, \mu_r = \frac{d}{R} = \tan \beta_r \dots\dots\dots (D. 32)$$

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2Bgs \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \beta_r)} \dots\dots\dots (D. 33)$$

$$s = \frac{V_0^2}{2Bg \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \beta_r)} \dots\dots\dots (D. 34)$$

D.3 滚石冲击回弹规律

D.3.1 假设

滚石坡面运动学分析时作如下假设：

- a) 边坡的坡面形状由多段折线组成；
- b) 滚石、坡面均为各向同性弹塑性体；
- c) 坡面岩土体满足莫尔-库仑准则；
- d) 滚石在坡面运动过程中发生平动和转动，平动时将其视为质点；滚动时将其视为球体。

D.3.2 滚石与坡面初次冲击回弹

D.3.2.1 假设滚石从某高度处脱离母岩由静止转向自由下落运动，并冲击坡面，假设坡度为 α (见图D.7)，滚石与坡面初始冲击时的速度见公式 (D.35)。

- D. 3. 2. 2 滚石初始冲击时的角速度为0（即不发生滚动），此时冲击速度沿坡面进行法向、切向分解，其公式见（D. 36）和公式（D. 37）。
- D. 3. 2. 3 回弹系数见公式（D. 38）和公式（D. 39）。
- D. 3. 2. 4 滚石初始回弹速度见公式（D. 40）和公式（D. 41）。
- D. 3. 2. 5 滚石与坡面冲击接触过程中由于摩擦而产生旋转，其角速度计算见公式（D. 42）。
- D. 3. 2. 6 滚石回弹后作抛物运动，其在空中的运动时间见公式（D. 43）。
- D. 3. 2. 7 滚石沿坡面运动距离见公式（D. 44）。
- D. 3. 2. 8 滚石落点速度即第二次冲击速度见公式（D. 45）和公式（D. 46）。

$$V_1 = \sqrt{2gh} \quad \dots\dots\dots (D. 35)$$

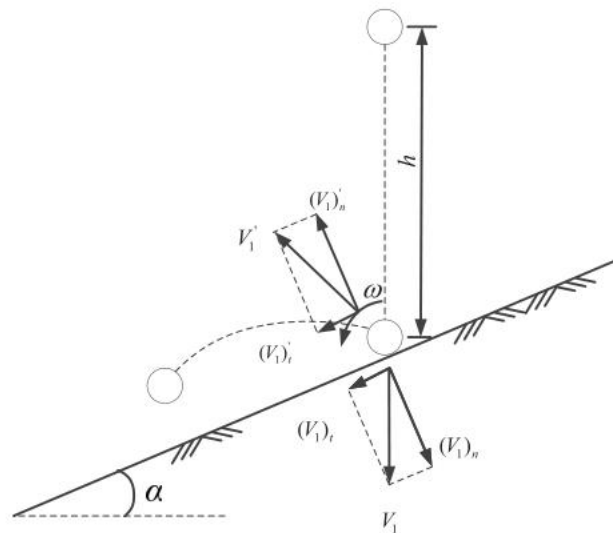


图 D. 7 滚石在自由落体状态时的初始撞击模型

$$(V_1)_n = \sqrt{2gh} \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (D. 36)$$

$$(V_1)_t = \sqrt{2gh} \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (D. 37)$$

$$e_n = \frac{V'_n}{V_n} \quad \dots\dots\dots (D. 38)$$

$$e_t = \frac{V'_t}{V_t} \quad \dots\dots\dots (D. 39)$$

$$(V_1')_n = (e_1)_n \cos \alpha \sqrt{2gh} \quad \dots\dots\dots (D. 40)$$

$$(V_1')_t = (e_1)_t \sin \alpha \sqrt{2gh} \quad \dots\dots\dots (D. 41)$$

$$\omega_1 = \frac{5 \sin \alpha \sqrt{2gh}}{2R} [1 - (e_1)_t] \dots\dots\dots (D. 42)$$

$$t_1 = \frac{2(e_1)_n \cos \alpha \sqrt{2gh}}{g \cos \alpha} \dots\dots\dots (D. 43)$$

$$l_1 = 4h \sin \alpha (e_1)_n [(e_1)_n + (e_1)_t] \dots\dots\dots (D. 44)$$

$$(V_2)_n = (e_1)_n \cos \alpha \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (D. 45)$$

$$(V_2)_t = \frac{\sqrt{2gh} \cos \alpha \cdot \sin \alpha [(e_1)_t + 2(e_1)_n]}{\cos \alpha} = \sin \alpha \sqrt{2gh} [(e_1)_t + 2(e_1)_n] \dots\dots\dots (D. 46)$$

D. 3. 3 滚石与坡面任意次冲击回弹

D. 3. 3. 1 假设滚石第*i*次冲击时的入射速度为*V_i*，滚石的角速度为*ω_{i-1}*，与坡面夹角为*θ_i*，坡面坡度为*α*，如图D. 8所示，则滚石的法向入射速度、切向入射速度分别按公式 (D. 47) 和公式 (D. 48) 计算。

D. 3. 3. 2 假设对应于第*i*次冲击的法向回弹系数和切向回弹系数分别为 $(e_i)_n$ 和 $(e_i)_t$ ，滚石回弹速度按公式 (D. 49) 和公式 (D. 50) 计算。

D. 3. 3. 3 滚石在冲击过程中，沿坡面的冲击力 $F_{ui} = m[(V_i)_t - (V_i)'_t]$ 将导致滚石自转角速度增加，其大小计算公式见公式 (D. 51)。

D. 3. 3. 4 滚石回弹后的角速度按公式 (D. 52) 计算。

D. 3. 3. 5 滚石在空中弹跃的时间按公式 (D. 53) 计算。

D. 3. 3. 6 经第*i*次冲击后滚石沿坡面的运动距离按公式 (D. 54) 计算。

D. 3. 3. 7 重复上述过程，可最终确定滚石从脱离母岩后沿坡面的运动全过程。

$$(V_i)_n = V_i \sin \theta_i \dots\dots\dots (D. 47)$$

$$(V_i)_t = V_i \cos \theta_i \dots\dots\dots (D. 48)$$

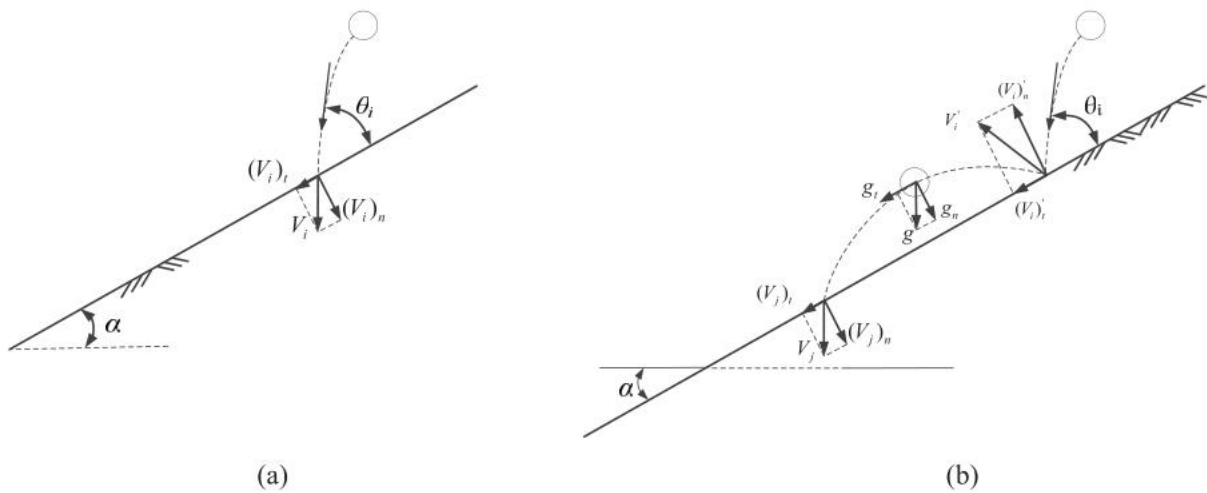


图 D. 8 任意角度下的滚石冲击模型

$$(V_i)'_n = (V_i)_n (e_i)_n \dots\dots\dots (D. 49)$$

$$(V_i)'_t = (V_i)_t (e_i)_t \dots\dots\dots (D. 50)$$

$$\Delta\omega_i = \frac{5(V_i)_t}{2R} [1 - (e_i)_t] \dots\dots\dots (D. 51)$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \frac{5(V_i)_t}{2R} [1 - (e_i)_t] \dots\dots\dots (D. 52)$$

$$t_i = 2 \left(\frac{(V_i)'_n}{g_n} \right) = \frac{2(V_i)_n (e_i)_n}{g \cos \alpha} \dots\dots\dots (D. 53)$$

$$s_i = (V_i)'_t t_i + \frac{1}{2} g t_i^2 = \frac{2(V_i)_n (e_i)_n [(V_i)_t (e_i)_t \cos \alpha + (V_i)_n (e_i)_n \sin \alpha]}{g \cos^2 \alpha} \dots\dots\dots (D. 54)$$

D. 4 恢复系数建议值

不同地质条件下的坡表的恢复系数可根据表D. 4的规定执行。

表 D. 4 常用恢复系数及来源

取值来源	坡面特征及场地描述	e_n	e_t
美国联邦公路 CRSP 计算程序	极软：以拳击易被打入几英寸	0.10	0.50
	软：拇指易压入几英寸	0.10	0.55
	坚实：一般用力下拇指可压入几英寸	0.15	0.65
	坚硬：拇指易压出痕迹，但需用力才可压入	0.15	0.70
	极坚硬：易被拇指指甲划伤	0.20	0.75
	坚固：难于被拇指指甲划伤	0.20	0.80~ 0.85
	极软岩：可被拇指指甲划伤	0.15	0.75
	较软岩：易地质锤尖打可破成碎片，易被小刀切削	0.15	0.75
	软岩：难被小刀切削，可以地质锤击打出浅坑	0.20	0.80
	中等岩：小刀不能切削，试件可被一下地质锤击碎	0.25	0.85
	硬岩：试件需要不只一下才可击碎	0.25~0.30	0.90
	较硬岩：试件需要多次才能击碎	0.25~0.30	0.95~1.0
	极硬岩：试件仅能被地质凿切割	0.25~0.30	0.95~1.0
Giani, 1992	基岩裸露	0.5	0.95
	块石堆积层	0.35	0.85
	岩屑堆积层	0.30	0.70
	土层	0.25	0.55

表 D.4 常用恢复系数及来源(续)

取值来源	坡面特征及场地描述	en	et
Giani, 2004,	基岩裸露	0.70	0.85
	密实碎屑堆积层	0.50	0.80
	松散碎屑堆积层	0.48	0.79
	植被区	0.30	0.30
HoDk, DvDrt.	干净的基岩裸露坡面	0.530	0.990
	沥青路面	0.400	0.900
	基岩露头或块石坡面	0.350	0.850
	碎屑覆盖层	0.320	0.820
	碎屑覆盖层有植被	0.320	0.800
	土层有植被	0.300	0.800
PEDiEEDr, 1990	光滑基岩裸露坡面或铺砌表面	0.37~0.42	0.87~ 0.92
	基岩出露和块石堆积层(无植被)	0.33~0.37	0.83~ 0.87
	岩屑堆积层和硬土边坡(矮植被)	0.30~0.33	0.82~ 0.85
	软土边坡	0.28~0.30	0.78~ 0.82
	碎屑覆盖层有植被或土层有少量植被		0.80~ 0.83
吕庆等	光滑而坚硬的表面和铺砌面, 如人行道或光滑的基岩面	0.37~0.42	0.87~ 0.92
	多数为基岩和砾岩区的斜面 (多数为基岩和无植被覆盖的斜坡)	0.33~0.37	0.83~ 0.87
	硬土边坡(多数为有少量植被的斜坡)	0.30~0.33	0.82~ 0.85
	软土边坡(植被覆盖斜坡和稀少植被土质坡)	0.28~0.30	0.80~ 0.83
	(灌木林覆盖的土质边坡)		0.78~ 0.82
	注: 括号中对应描述为切向恢复系数取值依据		
Chau, K. T, 1996	土层	0.393	0.567
	喷射混凝土面	0.453	0.737
	岩面	0.487	0.910

附 录 E
(规范性附录)
滚石冲击力计算方法

E.1 完全弹性条件下滚石的冲击特性

E.1.1 完全弹性状态下, 质量为 m 的滚石以速度 V 冲击垫层材料时, 根据能量守恒可得出公式 (E.1), 整理后得到公式 (E.2)。

E.1.2 滚石冲击力按公式 (E.3) 计算。

E.1.3 冲击过程中的最大法向压应力按公式 (E.4) 计算。

E.1.4 当最大冲击法向压应力超垫层材料的屈服强度时垫层材料开始发生塑性变形, 发生塑性变形的最小冲击速度 V_y 可按公式 (E.5) 或公式 (E.6) 计算。

$$\frac{1}{2}mV^2 = \int_0^{\delta} P_e(\delta)d\delta \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

$$\delta = \left(\frac{45\sqrt{3}mV^2}{128R^2E} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

$$P_e = \frac{32\sqrt{3}}{27}ER^{\frac{1}{2}} \left[\frac{45\sqrt{3}mV^2}{128R^2E} \right]^{\frac{3}{5}} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

$$P_{\max} = 0.443 \left[\frac{E^4}{R^3}mV^2 \right]^{\frac{1}{5}} \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

$$P_y = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{E}{R^{\frac{3}{4}}} \right)^{4/5} \left[\frac{5}{8}mV_y^2 \right]^{\frac{1}{5}} \quad \dots\dots\dots (E.5)$$

$$V_y = 7.62 \frac{P_y^{\frac{5}{3}}R^{\frac{3}{2}}}{E^2m^{\frac{1}{2}}} \quad \dots\dots\dots (E.6)$$

E.2 弹塑性条件下滚石的冲击特性

E.2.1 当滚石冲击速度 $V > V_y$ 时垫层材料发生塑性变形, 此时滚石冲击能量主要用于垫层材料塑性变形, 根据能量守恒定律可得公式 (E.7) 和公式 (E.8)。

E.2.2 通过公式 (E.8) 可计算 δ_{\max} , 具体如下:

- a) 当 $\delta < R$ 时, 垫层材料的最大接触半径和滚石冲击力分别按公式 (E.9) 和公式 (E.10) 计算;
- b) 当 $\delta \geq R$ 时, 垫层材料的最大接触半径和滚石的极限冲击力分别按公式 (E.11) 和公式 (E.12) 计算。

$$mgh = \int_0^{\delta_y} P_e(\delta)d\delta + \int_{\delta_y}^{\delta_{\max}} P_{ep}(\delta)d\delta \quad \dots\dots\dots (E.7)$$

$$mgh = \int_0^{\delta_y} P_e(\delta) d\delta + P_y(\delta_{\max} - \delta_y) + \pi R P_y (\delta_{\max} - \delta_y)^2 \dots\dots\dots (E. 8)$$

$$a_{\max}^2 = 2R\delta_{\max} - \delta_{\max}^2 \dots\dots\dots (E. 9)$$

$$P_{\max} = P_y + \pi P_y (a_{\max}^2 - a_y^2) \dots\dots\dots (E. 10)$$

$$a_{\max} = R \dots\dots\dots (E. 11)$$

$$P_{\lim} = P_y + \pi P_y (R^2 - a_y^2) \dots\dots\dots (E. 12)$$