维普资讯 http://www.cqvip.com

第32卷第2期 煤 炭 学 报 Vol. 32 No. 2
2007年 2月 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY Feb. 2007

文章编号:0253-9993(2007)02-0131-05

矸石山稳定性非线性极限分析上限法

董 倩[1,2], 刘东燕[1]

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 400042)

摘 要: 总结了矸石山几种失稳模式, 在分析矸石散体剪切强度非线性机理的基础上, 依据塑性极限分析原理, 考虑矸石散体抗剪强度的非线性, 利用极限分析上限定理针对矸石山内部滑坡进行稳定分析. 结果表明, 在中低围压下, 采用线性强度准则低估了矸石山的稳定性; 考虑矸石散体强度非线性可体现随高度增加矸石山稳定性降低的实际状态; 当矸石散体黏聚力为零时, 由非线性准则可得到合理的临界滑裂面.

关键词: 矸石散体; 边坡稳定性; 非线性强度准则; 塑性极限分析上限定理; 环境地质灾害效应

中图分类号: TD849.5; TD854.6 **文献标识码**: A

Nonlinear plasticity limit analysis upper bound method of gangue hill stability

DONG Qian[1,2], LIU Dong-yan[1]

(1. *Department of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing* 400045, *China*; 2. *School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing* 400042, *China*)

Abstract: Summarized several failure patterns of gangue hill and discussed the nonlinear mechanism of gangue shear yield rule. The analysis result shows that the Mohr failure envelopes for gangue exhibit significant nonlinearity particularly in low and medium stresses. The strength of gangue exhibits nonlinearity and the curved failure envelope could be described by exponential relationship. Based on the analysis results and the plastic limit analysis upper bound theorem, the gangue hill stability was analyzed with strength nonlinearity taken in account. Stability analysis of gangue hill slope indicates that safety factor of nonlinear analysis is bigger than linear analysis in low and medium stresses. Safety factor based on nonlinear rule vary with gangue hill height, but that of linear analysis is constant. The slip surface of linear analysis is shallow when the cohesion is zero, but that of nonlinear analysis is deep. The calculated outcome of nonlinear rule is more reasonable than that of linear rule.

Key words: gangue bulky material; slope stability; nonlinear yield rule; plastic limit analysis upper bound theorem; environmental geological hazard effect

作为世界上最大的煤炭生产和消费国, 我国排放及积存量最大、占用场地最多的工业废弃物是煤矿开采的副产品——煤矸石, 约占全国工业废渣排放量的1/4. 全国每年矸石排放总量约为1.7亿t, 但其综合利用仅为其排放总量的15%~20%, 余下的矸石以圆锥式或沟谷倾倒式自然松散地堆放在矿区四周, 全国现有上规模矸石山1 500余座, 累计存量约34亿t, 占地面积超过13 300 hm^2, 每年新增矸石占地超过400 hm^2, 矸石山几乎成为我国煤矿的“标志”[1,2].

我国贮矸场多数未经严格设计, 存在大量堆放不规范的矸石山, 各地矸石山时有垮塌、滑坡及泥石流事故发生, 造成生命财产的巨大威胁和损失. 因此, 矸石山环境地质灾害的防治相当重要.

收稿日期: 2006-06-12 责任编辑: 柴海涛
基金项目: 重庆国土资源和房屋管理局科研计划资助项目(财建[2003]660号)
作者简介: 董 倩(1971-)女, 辽宁沈阳人, 博士研究生. Tel: 023-65122851, E-mail: xykdq@163.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

1 矸石山的失稳模式

矸石堆积引发污染、占地、自燃、爆炸、结构侵蚀、失稳、景观破坏等环境及地质灾害效应，其中失稳效应是指矸石山崩塌、滑坡及泥石流. 矸石排放多为顺坡填沟，少数为平地起堆. 矸石山坡面在自重作用下形成，形态取决于散体动摩擦效应，自然安息角 38 ~ 42°，单体高度一般 20 ~ 60 m. 矸石山散体粒径为数毫米至几十厘米，下大上小，自然分选，本质上为不连续介质，结构疏松，应力 - 应变以塑性流动为主，稳定性普遍较差. 矸石山如果堆积过高、坡度过大，受人为开挖影响、爆炸影响、暴雨侵蚀时，易形成坍塌、滑坡、泥石流等重力灾害. 矸石山失稳模式主要有：① 矸石山表层局部坍塌、错动；② 矸石山内部滑坡；③ 矸石山沿原地表内部软弱层的滑移；④ 沿原地表接触面滑坡；⑤ 泥石流；⑥自燃、喷爆引起的滑坡.

矸石山存在多种失稳模式，颜荣贵等人已就其基底稳定性进行了相关研究[3,4]，但许多滑坡是矸石山坡体内部应力场变化后在坡体内产生滑移面. 因此，除自燃、喷爆特殊因素引起的滑坡外，应采用岩土工程理论对矸石山稳定性加以分析.

矸石山内部滑坡稳定性取决于矸石散体物质组成、抗剪强度、矸石山结构、固结、淋溶、内部物理化学变化等因素，对矸石山进行完整的应力、应变渐进性分析不太可能，由于仅关心矸石山稳定程度，不需要知道应力、应变如何随上述因素变化的具体量值，因此考虑采用塑性力学极限分析上限法进行稳定分析. 极限分析法不受结构几何形状和荷载情况复杂的影响，具有较严密的塑性力学理论基础，求解过程简便，能给出一个简单明了、实用的稳定性指标，并提供一个清晰的物理破坏模式图.

2 矸石散体抗剪强度的非线性

研究表明，岩土介质的非线性主要表现在内摩擦角对法向应力的依赖上，其主要原因归于剪胀速率的不均匀性，剪切带中主要颗粒相互接触、挤压所造成的破损，以及随着滑动的进行在滑动带中所产生的各种软化效应，如细化颗粒效应、滚轴效应等. 粗粒料强度包线初始段向上弯曲是由于低围压下相邻颗粒翻越导致体积膨胀以及剪胀率不断增大的结果，宏观上表现为内摩擦角增大；而强度包线后段向下弯曲的实质是颗粒破碎以及由此形成的细料充填粗颗粒间孔隙导致的体积减小并抑制剪胀效应发挥的结果，宏观上表现为内摩擦角降低. 因此，低压剪胀与高压破碎使抗剪强度包线呈现为非线性. 而具体到矸石散体的非线性特征主要出于以下机理.

矸石是物质组成比较特殊的土石材料，由大小不等、性质不一的粗细颗粒彼此充填而成，粒度构成上属于碎石类土，其强度决定于母岩强度、粒间摩擦与咬合效果的综合作用效应，粗细颗粒的充填状况决定着矸石散体强度的发挥度. ① 矸石散体主要由页岩类、泥岩类、砂岩类、碳酸盐岩类及煤粒、硫结核组成，除砂岩类风化较慢、粉碎较难外，其余均较易破碎、风化；② 矸石由人工开采破碎而成，颗粒粒径大，矸石棱角分明，近球度小，矸石间多为点接触，受力后易形成应力集中，且经开采破碎，矸石体内部多存在微小损伤裂纹，是受力薄弱区. 因此，即便在低围压下，矸石颗粒接触点应力集中后颗粒易产生破碎现象. 所以，不同于多数岩土介质，在低围压（$\sigma_3 < 300$ kPa）下，矸石散体就表现出较明显剪胀和颗粒破碎特性，随着应力的增高，破碎现象更为显著. 颗粒破碎引起粒间应力重新分布，粒间连结力变弱，颗粒易移动，导致内摩擦角降低，散体强度降低，表现为强度包线向下弯曲. 随着围压增大，由围压增加导致颗粒破碎效应逐步占主导作用，最终，矸石散体摩尔强度包线随围压增加形成曲线，如图 1 所示.

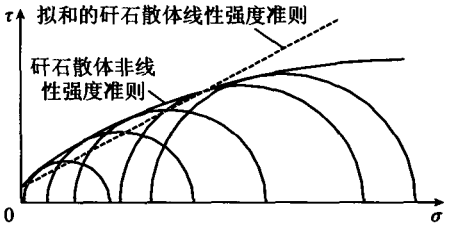


图 1 矸石散体的 $\tau - \sigma$ 关系曲线

Fig. 1 $\tau - \sigma$ curves of gangue

τ——剪应力；σ——正应力

矸石散体抗剪强度呈非线性，因此采用线性准则会导致

维普资讯 http://www.cqvip.com

分析结果偏差．文献［5］的工作发现，线性准则在高应力状态下会高估边坡稳定性；在低围压下会低估边坡稳定性，如图 1 所示．另外，矸石散体黏聚力为零时，线性稳定分析通常不能发现一个具有物理意义的临界滑裂面，得到相应于最小安全系数的滑裂面是一个非常浅的弧，但是发生滑动时，临界滑裂面是客观存在的．因此，应采用非线性强度准则对矸石山进行稳定分析，以寻求真实安全系数及其临界滑面．稳定分析时，指数关系强度准则收敛较快，适用于稳定计算，所以采用以下强度准则

$$\tau_f = c + A\sigma_n^m, \tag{1}$$

式中，τ_f 为抗剪强度；σ_n 为破坏面上的法向应力；c，A，m 分别为矸石的抗剪强度参数．

黏性矸石时，c 为黏聚力；无黏性矸石时，c 为咬合力，其取值受到矿物成分、颗粒形状、级配等的影响．$m=1$ 时，与库仑公式相同；当 $c=0$ 时，与德迈罗公式相同．

3　塑性力学极限分析上限法

3.1　矸石山破坏机构的建立

将矸石山视为均质边坡，内部滑坡的滑动面为圆弧形，根据 Sarma《边坡和堤坝稳定性分析》（1979）提出的概念[6]，建立圆弧滑面上分条块的破坏模式，容许机动场（即破坏机构）如图 2 所示．

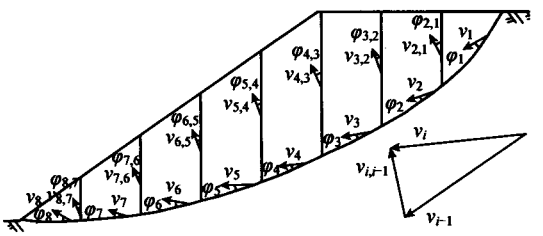


图 2　矸石山内部滑坡破坏机构及速度矢量

Fig. 2　Failure mechanism and velocity vector of gangue hill interior slide

φ_i——第 i 个条块沿滑裂面的速度间断面的内摩擦角；$\varphi_{i,i-1}$——第 i 与第 $i-1$ 两个相邻条块间速度间断面的内摩擦角

破坏机构中条块为刚体，条块内部不存在应力、应变，因此坡体内部能量的耗散主要集中在滑面和条块间速度间断面上[7]．根据极限分析上限理论，由相关流动法则知条块的速度 v 与速度间断面成 φ_i 角．为使条块组成机构的位移是协调的，相邻条块的滑面速度 v_i，v_{i-1} 与相邻条块间的速度间断面速度 $v_{i,i-1}$ 三矢量有闭合关系（图 2），根据相邻条块的几何关系与矢量闭合关系，可导出 v_i，v_{i-1}，$v_{i,i-1}$ 三者的速度递推公式为

$$v_i = v_{i-1}\frac{\cos(\alpha_{i-1}-\varphi_{i-1}-\varphi_{i,i-1})}{\cos(\varphi_i+\varphi_{i,i-1}-\alpha_i)},\quad v_{i,i-1} = v_i\frac{\sin(\varphi_i-\varphi_{i-1}-\alpha_i+\alpha_{i-1})}{\cos(\alpha_{i-1}-\varphi_{i-1}-\varphi_{i,i-1})}, \tag{2}$$

式中，$\varphi_{i,i-1}$ 为相邻条块速度间断面的内摩擦角；α_i，α_{i-1} 为第 i，$i-1$ 个条块滑面位置的倾角；φ_i，φ_{i-1} 为第 i，$i-1$ 个条块滑面位置的内摩擦角．

3.2　破坏机构的内能耗散和外功率

将滑体划分为 n 个条块，假设第 1 个条块（边界条件）的垂直速度分量为 v_0，则 $v_1 = v_0/\sin(\alpha_1-\varphi_1)$．根据速度矢量图，知道 v_1 后，任意一条块 v_i 和 $v_{i,i-1}$ 可表达成第 1 个条块速度 v_1 的线性函数，即

$$v_i = k_i v_1,\ v_{i,i-1} = k_i\frac{\sin(\varphi_i-\varphi_{i-1}-\alpha_i+\alpha_{i-1})}{\cos(\alpha_{i-1}-\varphi_{i-1}-\varphi_{i,i-1})}v_1,$$

其中

$$k_i = \prod_{i=2}^{n}\frac{\cos(\alpha_{i-1}-\varphi_{i-1}-\varphi_{i,i-1})}{\cos(\varphi_i+\varphi_{i,i-1}-\alpha_i)}.$$

内部能量损耗率计算公式为

$$D_n = \sum_{i=1}^{n} l_i c_i v_i\cos\varphi_i + \sum_{i=2}^{n} h_{i,i-1}c_{i,i-1}v_{i,i-1}\cos\varphi_{i,i-1}. \tag{3}$$

式（3）中等号右端第 1 项表示沿滑面的内能损耗率，其中 l_i 为第 i 个条块滑裂面的长度；第 2 项表示条块间速度间断面的内能损耗率，其中 $h_{i,i-1}$ 为相邻条块间界面长度．

维普资讯 http://www.cqvip.com

由坡体自重所做的外功率为

$$W_w = \sum_{i=1}^{n} W_i v_i \sin(\alpha_i - \varphi_i),$$

式中，W_i 为第 i 个条块的自重.

鉴于传统极限分析中采用线性准则，所以根据极限分析理论[8]："在结构的任何部分提高材料的屈服极限，不会降低结构的极限载荷."对非线性破坏准则的上限分析采用"切线法"，以提高材料强度为手段来分析结构物的上限解.

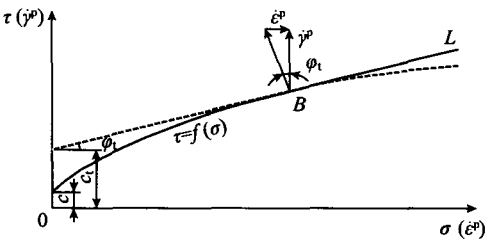


图 3 矸石散体屈服准则及流动法则

Fig. 3 Yield criterion and flow rule of gangue

$\dot{\varepsilon}^p$，$\dot{\gamma}^p$ 分别为塑性正应变率和剪应变率，其坐标轴分别与 τ，σ 重合；c 为初始黏聚力

图 3 中非线性屈服面（线）的斜率随应力 σ 单调递减，L 为经过非线性屈服面（线）上 B 点与其外切的直线，落在该屈服面（线）的外侧，其上所有点对应的材料强度相对提高，故当极限荷载最小上限值由非线性准则对应的外切线 L 的相应切点值确定，所得的上限解为真实极限载荷的上限. 切线 L 确定的线性屈服条件为

$$\tau = c_t + \sigma \tan \varphi_t,$$

式中，φ_t，c_t 分别为非线性屈服面（线）上 B 点对应的外切线 L 所确定的内摩擦角和黏聚力.

非线性屈服条件取指数形式，令 $\tau = f(\sigma)$，则

$$\varphi_t = \arctan f'(\sigma_B),\ c_t = f(\sigma_B) - \sigma_B \tan \varphi_t = f(\sigma_B) - \sigma_B f'(\sigma_B),$$

式中，σ_B 为切点 B 的应力值；$f'(\sigma_B)$ 为非线性屈服面（线）对应 σ_B 点的导数，即外切线 L 的斜率.

故非线性破坏准则的边坡稳定性问题可根据相对应的切线破坏准则估算极限荷载的最小上限. 在非线性强度准则下，对应一定的滑动面，界面和底面上的 c，φ 随应力的变化而变化，由切线法确定该条块滑动底面上 c_{it}，φ_{it} 代替线性准则中的 c_i，φ_i. 矸石山只承受自重，故 $\sigma_1 = \gamma h$，$\sigma_3 = 0.5\gamma h$.

3.3 安全系数的计算

由上限定理，斜坡处于极限破坏状态时，散体自重功率与塑性变形区内部能量损耗率相等，建立虚功率方程（$D_n = W_w$）. 安全系数采用与极限平衡法相同的定义，代入虚功率方程中，整理后可得到安全系数计算公式为

$$F = \left(\sum_{i=1}^{n} l_i c_{dit} v_i \cos\varphi_{dit} + \sum_{i=2}^{n} h_{i,i-1} c_{d(i,i-1)t} v_{i,i-1} \cos\varphi_{d(i,i-1)t} \right) \Big/ \sum_{i=1}^{n} W_i v_i \sin(\alpha_i - \varphi_{dit}),$$

式中，$\varphi_{dit} = \tan^{-1}\left(\dfrac{\tan\varphi_{it}}{F}\right)$，$\varphi_{d(i,i-1)t} = \tan^{-1}\left(\dfrac{\tan\varphi_{(i,i-1)t}}{F}\right)$；下角"d"表示考虑了 F 后的强度参数.

由于安全系数计算公式两端均含有 F 项，因此计算时需要进行迭代.

4 线性和非线性强度的计算结果分析比较

4.1 安全系数的计算结果

矸石山高 30 m，安息角为 38°，参照现场试验、地勘报告、工程经验及工程地质手册选取矸石散体线性强度参数 $c = 10$ kPa，$\varphi = 35°$；非线性强度参数 $A = 1.50$，$m = 0.9$. 计算得线性和非线性强度安全系数分别为 1.186，1.425. 线性强度下的安全系数低于非线性强度的安全系数，是由于矸石山常规堆积高度下，危险滑弧处的围压为 70 ~ 400 kPa，处于低围压状态，采用线性强度准则低估了矸石山的稳定性.

4.2 不同高度矸石山稳定分析结果

采用同上的线性和非线性强度计算参数，对不同高度坡体计算其稳定性，结果如图 4 所示. 由图 4 可知，采用非线性强度准则计算的安全系数 F 随坡高的增加而降低，这个规律符合矸石山堆积越高越不

维普资讯 http://www.cqvip.com

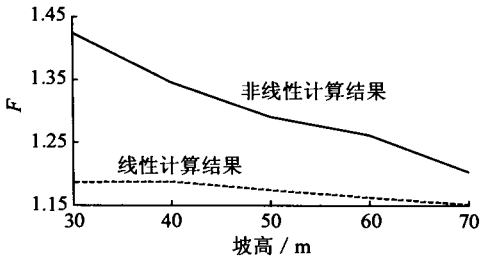


图4　不同高度矸石山坡体安全系数

Fig. 4　Safety factor of gangue hill with different height

安全的实际情况；而采用线性强度准则计算的安全系数 F 并没有明显变化，这是不符合实际的.

这是由于矸石山高度增加后，矸石山体内围压增大，高应力部位矸石散体内摩擦角减小，强度降低，导致矸石山稳定性降低. 采用非线性强度准则能反映矸石散体强度随围压变化的这种规律，随围压增加，由非线性强度准则确定的强度参数相应减小，因此，对应计算所得的安全系数减小. 而线性强度参数是由矸石散体弯曲的强度包线用直线作近似拟合得到的，在不同围压下，强度参数不变，所以，根据线性准则计算的安全系数不变.

4.3　危险滑弧的位置

对非黏性矸石，取线性强度参数 $\varphi=45°$，$c=0$，非线性强度参数同上，计算所得危险滑弧的位置不同，如图5所示. 因线性强度没有考虑黏聚力，坡体滑动实际上是表面滑动，其危险滑面的位置必然很浅；而非线性强度 φ 随应力增加而减小，因而坡面小应力部位抗剪强度较高；而靠近坡底的高应力部位抗剪强度较低，因此可能产生滑动破坏的位置向较深、应力较高的位置发展，并在一定深度处找到最危险的位置，形成与黏性土相似的圆弧形的危险滑动面.

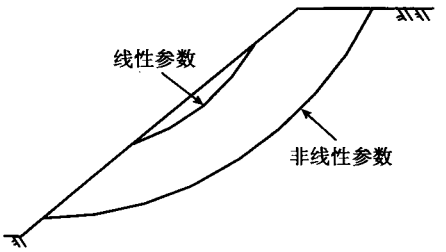


图5　线性、非线性参数计算所得的危险滑弧位置

Fig. 5　Critical slip face of linear and non-linear criterion

5　结　　论

（1）矸石山堆积造成一系列环境地质灾害效应，矸石山失稳模式主要有：矸石山表层局部坍塌、错动；矸石山内部滑坡；矸石山沿原地表内部的软弱夹层的滑坡；沿原地表接触面滑坡；泥石流、自燃、喷爆引起的滑坡.

（2）矸石散体的来源、特殊颗粒级配及所构成岩块的强度不同是影响其抗剪强度特性的主要物质特征，因而矸石散体变形破坏特性复杂，低压剪胀及颗粒破碎明显，抗剪强度与应力呈非线性关系.

（3）依据塑性极限分析原理，对矸石山内部滑坡进行稳定分析. 考虑矸石散体抗剪强度的非线性，在稳定性分析中采用非线性强度准则，获得的稳定性分析结果较线性准则更为合理，可为矸石山滑坡地质灾害的防治提供有效依据.

参考文献：

[1]　张凤辰. 煤矸石及其综合利用 [J]. 中国环保产业，2004，10：13～17.

[2]　马　超，康建荣，何万龙. 煤矸石排放对生态环境影响的分析 [J]. 煤矿环境保护，2000，14（6）：71～73.

[3]　颜荣贵，刘文钰. 排土场表土基底承载能力与土场高度的确定 [J]. 有色金属，1997，49（1）：10～13.

[4]　曹　阳，颜荣贵，黎　剑，等. 超高台阶排土场稳定的新机制与实践 [J]. 矿冶，2001，10（2）：1～7.

[5]　Jiang J C，Baker R，Yamagami T. The effect of strength envelope nonlinearity on slope stability computations [J]. Can Geotech J.，2003，40：308～325.

[6]　Sarma K S. Stability analysis of embankments and slopes [J]. Geotech. ASCE，1979，105（GT12）：1 511～1 524.

[7]　余同希. 塑性力学 [M]. 北京：高等教育出版社，1991.

[8]　陈惠发. 极限分析与土体塑性 [M]. 詹士斌，译. 北京：人民交通出版社，1995.