



强度折减法在平面滑动型岩质边坡的应用*

朱 擘^{1,2}, 何光春^{1,3}

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
3. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400074)

摘要: 岩质边坡平面滑动验算包括岩体内部结构面验算和岩体抗剪强度验算。均质边坡岩体由于抗剪不足产生平面滑动, 通过假定破坏面与内摩擦角之间关系迭代求解安全系数, 探寻破裂角和内摩擦角之间的关系, 进而提出简化估算安全系数公式。通过与数值解对比验算, 可知简化公式精度能够满足工程设计要求, 可为实际工程提供参考和借鉴。

关键词: 强度折减; 平面滑动; 简化估算; 破裂角; 安全系数

中图分类号: TU 458

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0065-05

Application of strength reduction in planar failure rock slope

ZHU Bo^{1,2}, HE Guang-chun^{1,3}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Southwest Water-transport Engineering Institute, Chongqing 400074, China)

Abstract: The checking of rock slope's plane sliding includes the internal structure of rock mass surface checking and rock shear strength calculation. The sliding of homogeneous rock slope is due to insufficient shear strength. By assuming the relationship between the failure surface and the internal friction angle, we probe into the relationship between the failure angle and internal friction angle, and then propose the simplified estimation formula. Comparing the analytical solution with the numerical solution, we know that the simplified formula meets the engineering requirements, and the conclusion may serve as a reference for the practical engineering.

Key words: strength reduction; plane sliding; simplified estimation; rupture angle; factor of safety

岩质边坡平面滑动是岩体破坏类型之一, 该种破坏通常是岩体沿着单一滑面滑动, 滑面可能是岩体内部发育的构造结构面, 也可能是由于极限平衡破坏产生的破裂面。本文研究的主要内容是均质单一层状岩体内部由于岩体极限平衡受力而产生滑动面。该种类型边坡常见于基坑工程、边坡工程。相应的工程设计应对该种类型的边坡受力进行分析, 《建筑边坡工程规范》5.3.1条给出平面滑动法求解最小稳定系数, 以保证工程安全。

对于均质边坡, 传统的方法主要有极限平衡法、极限分析法、滑移线场法等, 目前应用最多的依然是极限平衡法。本文主要将极限平衡法与强度折减法相结合, 通过折减岩土参数求解安全系数, 从而与有限元强度折减计算相对应, 验证计算结果。

1 强度折减法

边坡稳定分析安全系数定义有多种方式, 当

收稿日期: 2012-03-07

*基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(210176); 重庆市教委科技项目(KJ100426)

作者简介: 朱擘(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工结构方面的研究。

前公认和应用较多的有强度储备安全系数、超载储备安全系数、下滑力超载储备安全系数^[1]。

1952年毕肖普定义的边坡安全系数为：土坡某一滑裂面上抗剪强度指标按照同一比例降低，土体沿着此滑裂面处处达到极限平衡状态，则有

$$\tau = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (1)$$

根据抗滑力与下滑力之比得到：

$$F_{S1} = \frac{\int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl'}{\int_0^l \tau dl} \quad (2)$$

同时除以 F_{S1} 可得：

$$1 = \frac{\int_0^l (\frac{c}{F_{S1}} + \frac{\sigma}{F_{S1}} \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} = \frac{\int_0^l (c' + \sigma' \tan \varphi') dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (3)$$

当进行折减后，左式等于1，表明坡体达到极限平衡状态。

2 平面滑动分析

2.1 基本假设

1) 边坡上变形岩体为单一的层状结构，构造简单，岩体内部不包含不连续结构面(节理、裂隙、软弱夹层等)。

2) 计算不考虑包含岩体自重应力分布和地应力分布等在内的岩体内部应力分布。

3) 边坡破坏面近似于直线，平衡极限状态只在破裂面上出现，破坏时岩体整体下滑。

4) 破裂面点需近似通过边坡角点。

5) 破裂角与岩体内摩擦角之间关系假定为^[2]

$$\theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

2.2 强度折减极限平衡方程推求

由图1和极限平衡方程得：

$$G \cos \theta = N \quad (5)$$

$$G \sin \theta = T \quad (6)$$

由滑动体几何关系可知：

$$G = \frac{1}{2} \rho g H L \cos \theta \quad (7)$$

$$L = \frac{H}{\sin \theta} \quad (8)$$

破裂面上切向力 T 与抗剪强度相平衡：

$$T = \frac{1}{F} N \tan \varphi + \frac{cL}{F} \quad (9)$$

滑动系数定义：

$$K = \frac{T}{G \sin \theta} \quad (10)$$

将式(4)，(5)，(9)代入(10)，得迭代公式：

$$K = \frac{G \cos \theta \tan \varphi + cL}{F G \sin \theta} \quad (11)$$

将式(7)，(8)代入(11)，得估算公式：

$$K = \frac{\rho g H [1 + \cos(2\delta)] \tan \varphi + 4c}{F \rho g H \sin 2\delta} \quad (12)$$

$$\delta = 45 + \frac{\varphi}{4} \quad (13)$$

将式(13)代入(12)，得最终估算公式：

$$K = \frac{\rho g H (1 - \sin \frac{\varphi}{2}) \tan \varphi + 4c}{F \rho g H \cos \frac{\varphi}{2}} \quad (14)$$

令 $K=1$

$$F = \frac{\rho g H (1 - \sin \frac{\varphi}{2}) \tan \varphi + 4c}{\rho g H \cos \frac{\varphi}{2}} \quad (15)$$

式中： G 为滑体自重； L 为破裂面长度； H 为坡高； ρ 为密度； θ 为破裂角； φ 为土体内摩擦角； c 为土体粘聚力； F 为定义的安全系数； K 为稳定系数。

迭代计算采用式(11)进行，计算中先对土体的 c ， φ 进行折减，进而可以确定 θ ， L ， G ，最后求解稳定系数 K ，计算过程简单可以采用EXCEL表格进行计算，但是要注意 θ 是一个变化的过程，

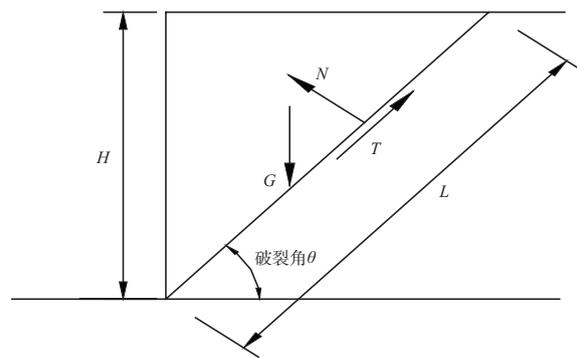


图1 平面滑动计算简图

因此而产生破裂面的变化和滑体重力的改变, 一直增加安全系数使得稳定系数趋近于1, 所求的安全系数就是岩体的边坡系数。估算采用式(15)进行。

3 计算实例

3.1 岩体物理力学参数

模型主要尺寸如图2所示, 模型高40 m, 边坡高度为25 m, 地基为15 m。岩体参数见表1。

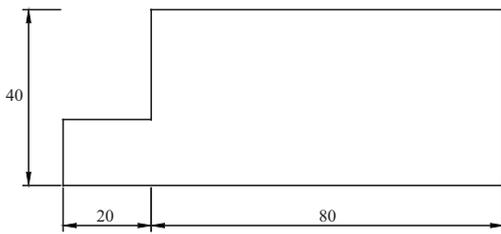


图2 算例边坡(单位: m)

表1 岩体物理力学参数

材料名称	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	c/MPa	$\phi/(\circ)$	E/GPa	μ
岩体	2.45	0.2	30.0	1.0	0.2

3.2 计算迭代结果

通过EXCEL迭代计算求得该模型的安全系数为1.790。由图3可以得出, 安全系数与稳定系数之间关系: 随着安全系数(折减系数)的增加, 滑动系数由1.842逐渐减低至1。安全系数与滑动系数近似为抛物线型。通过图4可以得出, 随着安全系数(折减系数)的增加, 破裂面迭代呈现逐渐降低的趋

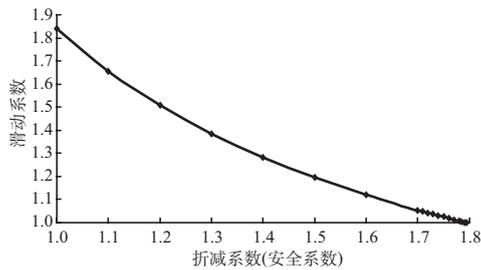


图3 安全系数与滑动系数关系

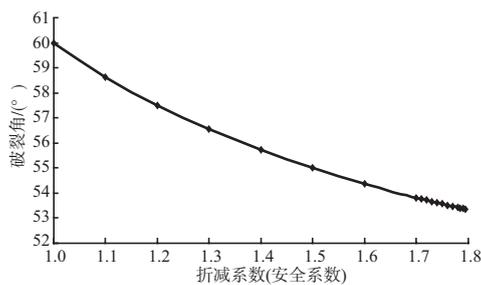


图4 安全系数与破裂角关系

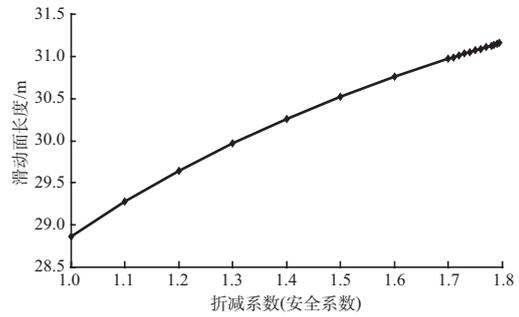


图5 安全系数与破裂面长度关系

势, 至迭代停止时, 破裂角近似为 $\delta = 45 + \frac{\phi}{4}$ 。通过图5可以得出, 破裂面的长度随着安全系数的增加而增加, 随着破裂角度的降低, 滑动面增长。滑动面的长度所对应的抗滑力的增加不是决定滑动破坏的唯一因素, 还与下滑力 G 有关。

3.3 数值验证

郑颖人等^[3]通过采用平面应变下的摩尔匹配DP准则, 采用有限元中边坡分析力和位移不收敛以及以广义塑性应变或者等效塑性应变从坡脚到坡顶贯通作为破坏判据, 对岩质边坡和土质边坡进行稳定分析。通过采用通用有限元分析软件ANSYS将DP4准则转化为DP1准则^[4], 采用ANSYS命令流对于边坡求解边坡安全系数。同时采用加拿大边坡稳定分析软件GEOSLOPE/W对计算结果进行对比分析。对比结果见表2。

表2 不同计算方法结果对比

计算方法	安全系数			
	ANSYS-DP4准则	迭代方法	简化估算	Spencer Janbu
安全系数	1.734	1.792	1.795	1.749 1.790

通过对模型进行对比分析可知, 本文循环迭代求解和简化估算方法均与ANSYS匹配DP4准则(图6)和Spencer(图7)、Janbu算法求解的安全系数比较接近, 迭代算法与ANSYS匹配DP4准则、Spencer、Janbu计算相对误差分别为3.2%, 2.3%, 0; 简化算



图6 ANSYS-DP4准则岩体塑性区贯通

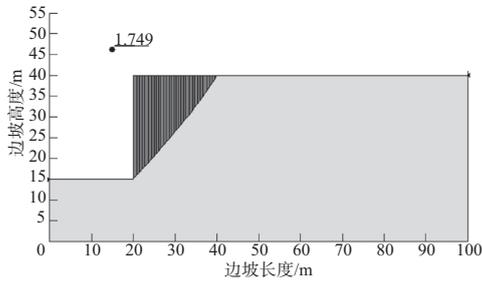


图7 Spencer法求解安全系数

法迭代算法与ANSYS匹配DP4准则、Spencer、Janbu 计算相对误差分别为3.5%，2.6%，0.3%。

4 影响因素

通过对模型边坡高度、不同岩体^[5]对比分析

求解，验证公式对于不同岩土体的适应性。通过表3、图8可以得出：对于边坡高度在5~30 m范围内，分别应用迭代求解和简化估算公式求解同Spencer、Janbu算法接近在工程设计可以接受的范围内。通过表4、图9可以得出：对于其他条件近似相同的条件下，岩体粘聚力增加，迭代求解和估算公式计算精度差别不明显，简化估算和迭代算法相对其他算法最大相对误差分别为3.95%和2.63%，运用迭代公式和简化估算公式精度都在允许范围之内，为工程应用方便可以采用简化计算公式；通过表5、图10可以得出：对于内摩擦角变化增长，简化估算和迭代算法相对其他算法最大相对误差分别为13.4%和3.18%。

表3 不同边坡高度下计算结果

$\rho/(t \cdot m^{-3})$	c/kPa	$\phi/(\circ)$	边坡高度/m	安全系数			
				迭代方法	简化估算	Spencer	Janbu
2.45	200	30	5	7.084	7.204	7.168	7.498
2.45	200	30	10	3.799	3.824	3.824	3.960
2.45	200	30	15	2.693	2.697	2.635	2.726
2.45	200	30	20	2.133	2.133	2.087	2.113
2.45	200	30	25	1.792	1.795	1.749	1.790
2.45	200	30	30	1.562	1.569	1.520	1.563

表4 粘聚力值变化计算结果

岩石名称	岩石性质	边坡高度/m	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	$\phi/(\circ)$	c/kPa	安全系数			
						迭代方法	简化估算	Spencer	Janbu
灰岩泥岩互层	弱风化	20	2.646 0	32.619	130	1.491	1.503	1.483	1.521
云母片岩	千枚质	20	2.489 2	29.250	330	3.162	3.173	3.131	3.226
石英砂岩	弱风化	20	2.636 2	32.620	330	3.077	3.088	3.064	3.160
页岩	片理发育	20	2.695 0	30.540	400	3.509	3.528	3.466	3.580
泥岩	含钙芒硝	20	2.430 4	33.822	520	4.903	4.969	4.837	4.957
泥岩	含钙芒硝	20	2.244 2	39.000	710	7.091	7.285	7.008	7.146

表5 内摩擦角变化计算结果

岩石名称	岩石性质	边坡高度/m	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	$\phi/(\circ)$	c/kPa	安全系数			
						迭代方法	简化估算	Spencer	Janbu
石英砂岩	灰绿色	20	2.528 4	13.50	250	2.204	2.205	2.177	2.223
板岩	炭质	20	2.077 6	14.04	25	0.422	0.464	0.409	0.435
花岗岩	粗粒，蚀变	20	2.391 2	22.29	320	3.059	3.065	3.030	3.079
角砾岩		20	2.587 2	35.75	53	0.870	0.955	0.858	0.878
黑云母花岗岩	微风化	20	2.538 2	44.13	600	5.614	5.755	5.584	5.696
黑云母花岗岩	弱风化	20	2.499 0	55.60	289	3.479	3.496	3.488	3.572

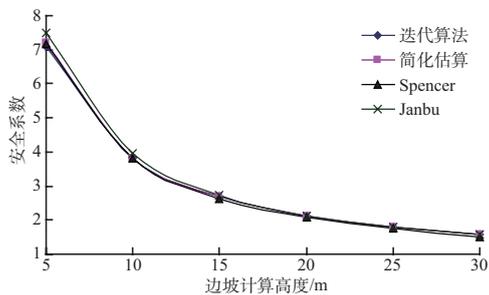


图8 不同边坡计算高度下安全系数

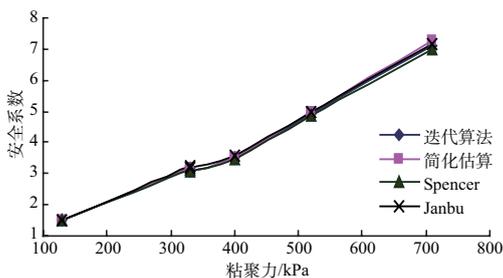


图9 粘聚力值变化计算结果

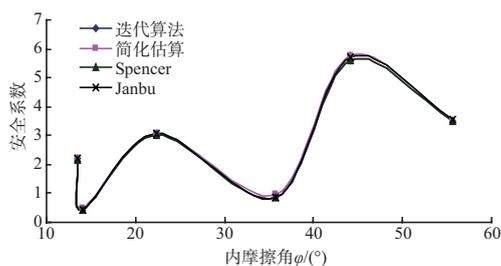


图10 内摩擦角变化计算结果

5 结论

本文将极限平衡计算同强度折减法应用于平面滑动型岩质边坡, 通过迭代算法和简化估算法对于岩质边坡平面滑动破坏进行安全系数求解。通过对于计算模型进行假定, 将计算结果对比 ANSYS 匹配 DP 准则、GENSLOPE/W 等算法得出以下主要结论:

1) 迭代算法和简化算法对于强风化层岩质边坡和软质岩层, 岩体安全系数计算精度可观, 完全能够满足工程设计要求的精度, 为简化计算可以采用简化公式进行计算。

2) 对于边坡高度在一定范围内迭代算法和简化估算计算精度相近, 随着边坡高度的增加, 边坡安全系数逐渐降低, 简化估算公式相对其他算法误差最大为 3.22%, 能够满足工程计算精度要求。

3) 对于粘聚力逐渐增加, 由表 4 可知: 安全

系数随着粘聚力增加而增加; 迭代算法相对其他算法误差要小于简化估算, 其主要原因在于简化估算假定的固定岩体破裂角和实际破裂角有一定差距造成的, 但简化估算最大相对误差在 3.95%, 可知简化估算的方法能够较准确地计算安全系数, 能够符合工程精度要求。

5) 对于内摩擦角逐渐增加, 粘聚力对于安全系数的计算影响较大, 安全系数与粘聚力呈现正相关。迭代算法相对其他算法误差同样要小于简化估算, 其主要原因还是在于简化估算假定的固定岩体破裂角和实际破裂角有一定差距造成的, 简化估算最大相对误差在 13.4%, 而该误差出现于粘聚力较小的岩体中, 如表 5 中的板岩和角砾岩, 计算中应予以注意。

6) 公式假定破裂面近似通过坡脚点, 对于内摩擦角在 60° 之上, 粘聚力在 1 000 kPa 之上的岩体计算结果不理想, 主要原因在于破裂面不再通过坡脚点, 岩体临空面增加, 底部约束减弱, 假定不符合实际。

7) 采用相同的折减系数不符合实际, 此种边坡发生滑动只有 c 值发挥充分时才能产生更大的滑动力, 因此建议采用双强度折减系数进行迭代求解 c 值折减系数应小于 ϕ 值折减系数, 这样更加符合实际^[6]。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 赵尚毅. 边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 937-1 940.
- [2] 张静波, 练伟. 谈谈岩体等效内摩擦角的计算公式[J]. 岩土工程界, 2006 (12): 16-17.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 381-3 388.
- [4] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪, 等. 有限元极限分析法及其在边坡工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 50-52.
- [5] 水利水电科学研究院. 岩石力学参数手册[M]. 北京: 水利水电出版社, 1991
- [6] 唐芬, 郑颖人. 边坡稳定安全储备的双折减系数推导[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2007, 26(4): 95-100.

(本文编辑 武亚庆)