



双强度折减法在平面滑动岩质边坡中的应用

程小龙¹, 张绪进², 朱 擘¹

(1.重庆交通大学 河海学院, 重庆400074; 2.西南水运工程科学研究所, 重庆 400074)

摘要: 主要研究均质边坡岩体在抗剪不足的情况下的平面滑动状态和规律。通过假定破坏面与内摩擦角之间的关系, 来近似求解安全系数。考虑到双强度极限平衡条件, 采用不同的折减方式和折减系数, 并且与有限元强度折减对比分析, 阐明边坡破坏各物理量之间的联系, 然后找出确定双强度折减系数的主要参考依据, 从而为该领域的进一步研究提供参考性意见。

关键词: 双强度折减; 平面滑动; 破裂角; 安全系数

中图分类号: TU 449

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0072-05

Application of dual strength reduction factors in planar failure rock slope

CHENG Xiao-long¹, ZHANG Xu-jin², ZHU Bo¹

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. South-west Water Transport Engineering Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Plane sliding is a simple form of the rock slope sliding. Insufficient homogeneous rock slope due to shear plane sliding is the major object of study. By assuming the iteration of the relationship between the failure surface and the angle of internal friction, we obtain the safety factor. Considering the limit equilibrium, using different reduction methods and reduction factors with are compared with those of the finite element method, we obtain the relationship among all physical quantities, and find the main reference for determining the double-strength reduction factors, which may serve as reference for further study of the field.

Key words: dual strength reduction factor; plane sliding; rupture angle; safety factor

岩质边坡平面滑动是岩体破坏类型之一, 该类破坏通常是岩体沿着单一面滑动, 滑面可能是岩体内部发育的结构面, 也可能是由于极限平衡破坏产生的破裂面。本文依据的主要破坏状态是均质单一层状岩体内部由于岩体极限平衡受力而产生的滑动, 该类型边坡破坏在基坑工程和边坡工程中经常发生。现阶段这方面也有一定的研究和突破, 同时也制定了相关的工程规范。《建筑边坡工程规范》5.3.1条给出了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。国内对于强度折减法在岩质边坡和土质边坡方面做了大量的工作, 有的将强度折减法和有限元法结合在一起, 此法因适应性强, 操作性较好等优点, 得到了广泛应用。本文主要将极限平衡法与强度折减法相结合, 通过折减岩土参数来求解安全系数, 并与有限元强度折减计算结果相对应, 得出可行性结论。

1 双强度折减法

在边坡稳定分析中, 安全系数的确定有多种方式, 当前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]。

收稿日期: 2012-06-27

作者简介: 程小龙(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程结构及渗流方面的研究。

在历史上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, 在边坡滑动过程中, 其粘聚力 c 和摩擦角 φ 对该状态会有一定程度的影响, 其发生影响的先后顺序不同, 两者的影响程度也不一致。

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

其中 $c' = c / F_c \quad (2)$

$$\varphi' = \varphi / F_\varphi \quad (3)$$

则 $\tau = c / F_c + \sigma \tan \varphi / F_\varphi \quad (4)$

式中: τ 为平行于滑移面的切应力; σ 为滑移面法向应力; F_c 为粘聚力折减系数。为了更为准确地反映粘聚力 c' 和摩擦角 φ' 各自的安全储备, 本文有必要采用不同的安全系数或折减系数^[2]进行研究。

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^[3]假定为

$$\theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad (5)$$

2.2 双强度折减极限平衡方程推求

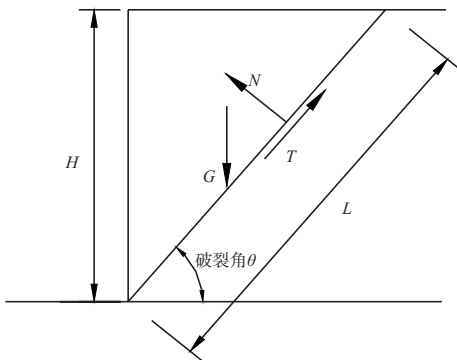


图1 平面滑动计算简图

由极限平衡方程得:

$$G \cos \theta = N \quad (6)$$

$$G \sin \theta = T \quad (7)$$

由滑动体几何关系可知:

$$G = \frac{1}{2} \rho g H L \cos \theta \quad (8)$$

其中 $L = \frac{H}{\sin \theta} \quad (9)$

由破裂面上切向力 T 与抗剪强度平衡条件得:

$$T = \frac{1}{F_\varphi} N \tan \varphi + \frac{cL}{F_c} \quad (10)$$

滑动系数定义:

$$K = \frac{T}{G \sin \theta} \quad (11)$$

将式(5), (6), (10)代入(11), 得迭代公式:

$$K = \frac{F_c G \cos \theta \tan \varphi + F_\varphi c L}{F_c F_\varphi G \sin \theta} \quad (12)$$

式中: G 为滑体自重(kN); L 为破裂面长度(m); H 为坡高(m); ρ 为密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); θ 为破裂角($^\circ$), φ 为土体内摩擦角($^\circ$); c 为土体粘聚力(MPa); F_c 为粘聚力折减系数; F_φ 为内摩擦角折减系数; K 为稳定系数。

迭代计算采用(11)式进行, 计算中先对土体的 c 和 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, 并不断改变破裂面和滑体重力, 然后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。

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。

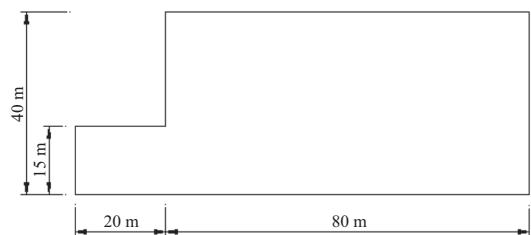


图2 算例边坡

表1 岩体物理力学参数

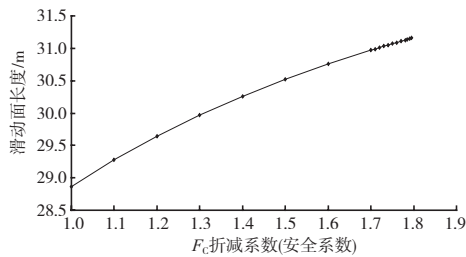
材料名称	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$	E/GPa	μ
岩体	2.45	0.2	30.0	1.0	0.2

3.2 计算以及迭代结果

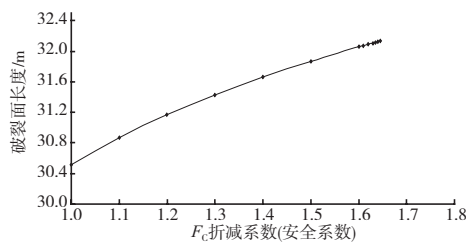
目前对这方面有关的计算已有突破, 郑颖人等^[4]利用平面应变下的摩尔匹配DP准则, 考虑有限元中边坡应力和位移不收敛、广义塑性应变、等效塑性应变、从坡脚到坡顶贯通等因素, 对岩质边坡和土质边坡进行稳定分析。具体操作是运用有限元分析软件Ansys将DP4准则转化为DP1准则^[5]来求解边坡安全系数。本文求解破裂角主要是依靠Ansys软件中塑性贯通区单元结果的显示, 以坡顶塑性区中点作为破裂点, 来估算破裂角, 同时采用边坡稳定分析软件GEOSLOPE/W对计算结果进行对比分析。

3.2.1 内摩擦角倍于粘聚力损失

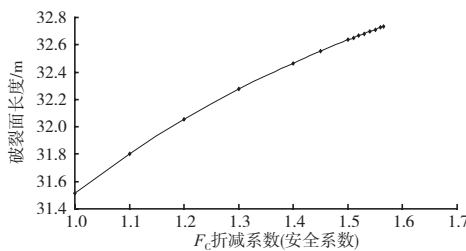
假定内摩擦角在滑动后损失较多, 粘聚力损失程度较少。图3显示迭代计算后安全系数和破裂面长度L之间的关系。从图中可以看出:



a) $F_\varphi = F_c$



b) $F_\varphi = 1.5F_c$



c) $F_\varphi = 2.0F_c$

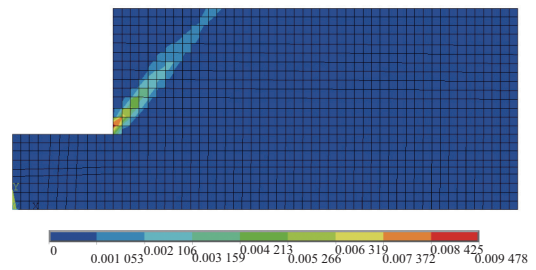
图3 安全系数与破裂面关系

1) 迭代结果显示, 破裂面随着安全系数的增加而增加; 同时随着破裂面长度的增加, 破裂角迭代结果不断减小。

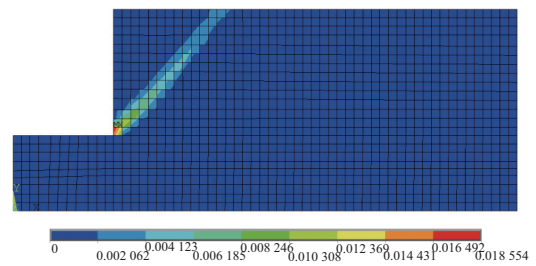
2) 随着内摩擦角逐渐的增大, 最后迭代的破裂面长度由31.158 m单调增加至32.735 m。该增长趋势同有限元分析结果吻合。

3) 从图4结果可以看出, 随着内摩擦角逐渐增大, 塑性贯通区逐渐向破裂角减小的方向发展。从表2结果可以看出, 破裂角从51.857°降低为49.523°, 呈单调递减的趋势。通过有限元计算结果可以看出迭代算法的相差较小。同时塑性贯通区形状由直线型向圆弧型发展的趋势, 说明随着破裂面长度的增加, 破裂面保持直线剪切越来越难, 与基本滑面为直线假定不相符。

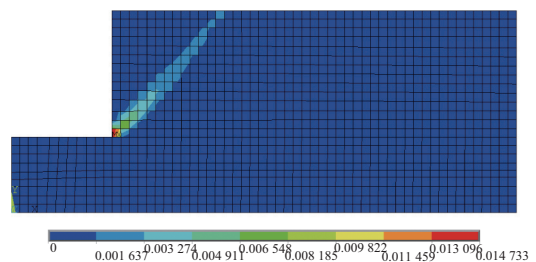
4) 迭代计算与有限元分析在趋势基本上一致。但是随着倍数关系的增加, 最后得到的安全系数 F_φ 随之降低。从表3可以看出, 安全系数呈现降低的趋势, 其精度对比误差不超过3%。



a) $F_\varphi = F_c$



b) $F_\varphi = 1.5F_c$



c) $F_\varphi = 2.0F_c$

图4 Ansys塑性区贯通

表2 内摩擦角计算结果

折减方式	X坐标/m	边坡高度/m	近似破裂角/(°)	迭代计算	相对误差/%
$F_c = 2F_\psi$	17.931	25.000	54.350	58.825	8.23
$F_c = 1.5F_\psi$	18.782	25.000	53.083	56.321	6.10
$F_c = F_\psi$	19.633	25.000	51.857	53.380	2.94
$F_\psi = 1.5F_c$	20.484	25.000	50.670	51.079	0.81
$F_\psi = 2F_c$	21.335	25.000	49.523	49.792	0.54

表3 内摩擦角倍于粘聚力折减安全系数计算结果

折减方式	本文方法		Ansys-DP4准则	
	F_c	F_ψ	F_c	F_ψ
$F_\psi = F_c$	1.785	1.785	1.735	1.735
$F_\psi = 1.5F_c$	1.645	2.467	1.611	2.417
$F_\psi = 2F_c$	1.565	3.130	1.533	3.066

3.2.2 粘聚力倍于内摩擦角损失

假定粘聚力在滑动后损失较多, 内摩擦角损失程度较少。其安全系数和破裂面长度L之间的关系, 如图3a)和图5计算结果所示:

- 1) 迭代过程都显示为破裂面长度随着安全系数的增加而增加, 但是迭代结果不断减小。
- 2) 随着粘聚力逐渐大于内摩擦角, 最后迭代的破裂面长度从31.158 m降低至29.224 m, 呈递减的趋势, 该趋势与有限元分析结果吻合。
- 3) 从图4a) 和图6的有限元分析结果表明, 随着粘聚力逐渐大于内摩擦角, 使得塑性贯通区逐渐向破裂角增大的方向发展。从表2中的计算结果

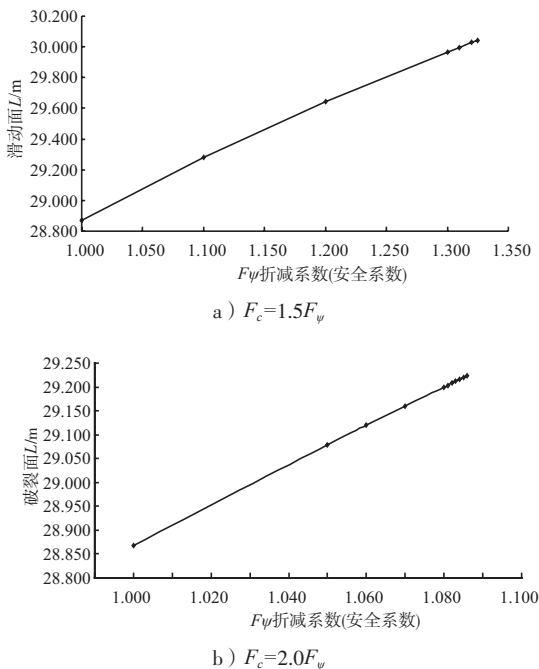


图5 安全系数与破裂面关系

可以看出, 破裂角从51.857°增加为54.350°, 呈单调递增的趋势, 精度对比误差不超过9%。并且塑性贯通区形状呈现较为稳定的直线型, 塑性贯通区贯通趋势明显。

4) 迭代计算与有限元分析在趋势上是一致的。随着倍数关系的增加, 而最后得到的安全系数 F_ψ 随之降低。但是降低幅度大于内摩擦角, 表明该模型对于边坡内摩擦角的变化反应较为敏感。从表4可以看出, 安全系数呈现降低的趋势, 计算精度对比误差不超过6%。

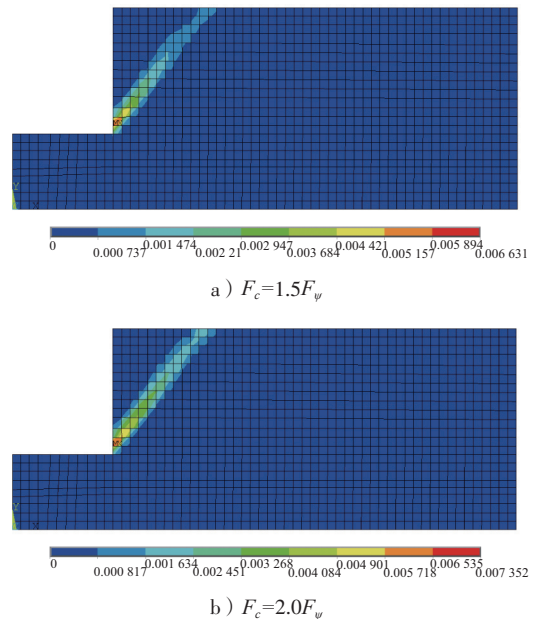


图6 Ansys塑性区贯通

表4 粘聚力倍于内摩擦角折减安全系数计算结果

折减方式	本文方法		ANSYS-DP4准则	
	F_ψ	F_c	F_ψ	F_c
$F_c = F_\psi$	1.785	1.785	1.735	1.735
$F_c = 1.5F_\psi$	1.325	1.988	1.249	1.874
$F_c = 2F_\psi$	1.085	2.170	1.000	2.000

4 结论

本文将极限平衡计算与强度折减法结合, 并应用于平面滑动型岩质边坡, 利用迭代算法

和Ansys有限元法，求解岩质边坡平面滑动破坏中的安全系数。对其计算模型进行假定，将计算结果与Ansys中的计算结果进行对比，再利用GENSLOPE/W计算结果进行校核，得出以下主要结论：

1) 迭代算法比Ansys有限元算法计算精度较高，能够满足工程设计要求，在该种边坡中，公式中的假定破裂角和内摩擦角之间的关系是合理的，迭代计算方便，后期数据可通过Excel等工具进行求解。

2) 利用迭代算法和Ansys算法共同对破裂角、破裂面长度进行计算，其计算结果显示的趋势和计算出的数值表现的趋势较为相似，并且通过迭代算法可以进一步看出折减过程中各种物理量的变化情况和折减趋势。

3) 在采用不同的折减系数来计算内摩擦角和粘聚力，其较为真实地模拟了工程情况。GENSLOPE/W计算采用的是条分法，由图7可知破裂角约为 51.152° ，依据该破裂面同Ansys计算和迭代计算相差不大，同时考虑平面滑动假定条件和岩体的剪切特征，通过综合分析，最终确立折减系数。结合Ansys贯通区的形状可知，运用有限元法和迭代算法时，均可取 $F_c = (1.0 \sim 1.5)F_{\psi}$ 来进行折减。

4) 在假定破裂面近似通过坡脚点条件下，对于内摩擦角在 60° 之上，粘聚力在1 000 kPa之上的

岩体来说，其计算结果并不理想，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。所以工况条件的拟定还需进一步的研究。

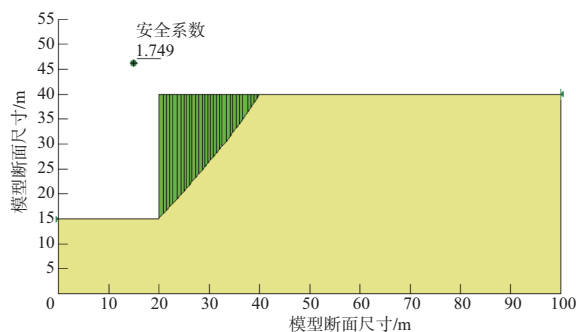


图7 Spencer法求解安全系数

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] 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.
 [3] 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.
 [4] 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.
 [5] 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.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。