

文章编号: 1674—8247(2019)05—0005—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.05.002

边坡稳定性分析中传递系数法显式解和隐式解 安全系数的对应关系探讨

邱永平 刘菀茹 张东卿 罗一农

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文研究了边坡稳定性分析中传递系数法显式解和隐式解安全系数的对应关系,总结了以下规律:(1)滑面为直线时,显式解和隐式解安全系数的对应关系与滑坡稳定系数有关,其公式为 $K_y = 1/[1 - (K_x - 1)/K_w]$; (2)滑面为折线时,隐式解安全系数取值由上述公式结果再乘以折减系数,折减系数大致在0.97~1.0范围内。折减系数取值与滑面形态、滑坡当前稳定性、安全系数取值等因素有关。通常当滑面弧度越大、滑坡当前稳定系数越大、安全系数取值越大时,采用的折减系数取值应越小; (3)强度折减法数值分析时,可采用计算出并折减后的隐式解安全系数进行分析; (4)若显式解的安全系数取值为1.05~1.25时,则其对应隐式解的建议取值为:直线型滑面取1.05~1.35;折线形滑面取1.05~1.35,并进行折减,折减系数0.97~1.0,中间值可按上述公式计算并折减。

关键词:边坡; 稳定性; 安全系数; 传递系数法; 显式解; 隐式解; 增大下滑力法; 强度折减法

中图分类号:U213.1+3 **文献标志码:**A

5

Discussion on Corresponding Relationship of Safety Factors between Explicit and Implicit Solution in Slope Stability Analysis

QIU Yongping LIU Wanru ZHANG Dongqing LUO Yinong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper studies the corresponding relationship of safety factors between explicit and implicit solution obtained by transferring coefficient method in slope stability analysis and summarizes the following rules: (1) When the sliding surface is a straight line, the corresponding relationship between explicit and implicit solution safety factors is related to the landslide stability coefficient, which of the formula is $K_y = 1/[1 - (K_x - 1)/K_w]$. (2) When the sliding surface is a broken line, the implicit solution safety factor value is that the result calculated by above formula is multiplied by the reduction factor that is approximately in the range of 0.97~1.0. The value of the reduction factor is related to the sliding surface morphology, current stability of landslide and safety factor value. Generally, when the radian of the sliding surface is larger, the stability coefficient of the landslide is larger, and the safety factor is larger, the value of the reduction factor should be smaller. (3) In the numerical analysis of the strength reduction method, the implicit safety factor after the reduction can be used. (4) If the explicit solution safety factor is 1.05~1.25, the recommended value of the corresponding implicit solution is 1.05~1.35 when the sliding surface is a straight line and the sliding surface is a broken line, and is reduced, and the reduction factor is 0.97~1.0. The medium value can be

收稿日期:2019-10-08

作者简介:邱永平(1971-),男,教授级高级工程师。

引文格式:邱永平,刘菀茹,张东卿,等. 边坡稳定性分析中传递系数法显式解和隐式解安全系数的对应关系探讨[J]. 高速铁路技术,2019,10(5): 5-8.

QIU Yongping, LIU Wanru, ZHANG Dongqing, et al. Discussion on Corresponding Relationship of Safety Factors between Explicit and Implicit Solution in Slope Stability Analysis [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(5): 5-8.

calculated and reduced according to the above formula.

Key words:slope; stability; safety factor; the method of transferring coefficient; explicit solution; implicit solution; the method of increasing sliding force; the method of decreasing strength

边坡稳定型分析是一个研究历史比较悠久的课题,稳定性计算也有相当多的成熟方法,如瑞典圆弧法(Fellenius 法)、简化 Bishop 法、简化 Janbu 法、美国陆军工程师团法、罗厄法(Lowe-Karafiath)、Sarma(I)法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法、不平衡推力法(传递系数法)等。其中,传递系数法在我国工程建设中应用普遍。传递系数法按安全系数作用的不同可分为增大下滑力法和滑面强度折减法,增大下滑力法可得出稳定系数的解析解,也称为显示解法。强度折减法需经迭代计算才能得出稳定系数,也称为隐式解法。

不同行业现行规范中边坡稳定的推荐求解方法如表 1 所示,从表中可以看出各行业推荐采用的方法并不统一。在计算机应用尚未普遍应用时,显式解法由于求解比较方便,在国内应用广泛,在安全系数如何取

值上也得到了大量经验,因此各行业规范普遍采用显式解法。

由于显式解法采用了增大下滑力的方式,而其它稳定计算方法都采用滑面强度折减的方式,计算原理的差异使显式解法常常受到质疑,各个行业也逐渐开始采用隐式解法。从而在稳定计算时,面临显式解法和隐式解法的安全系数取值如何匹配,才能使两者边坡稳定性评价结果相同的问题。同时随着数值分析强度折减法在边坡稳定性分析中的广泛应用,大型工程滑坡要求同时采用传递系数显式解法和数值分析强度折减法进行计算分析,同样面临两种算法安全系数取值匹配的问题。长期以来,业内同行为研究两者的匹配关系做了大量工作,但均未取得实质性成果。本文对此展开研究,以供同行参考。

表 1 各行业现行规范求解方法一览表

序号	规范名称	推荐方法	标准类型	求解方法
1	TB 10035 - 2018 铁路特殊路基设计规范	传递系数法	铁路行业标准	显式
2	TB 10025 - 2006 铁路路基支挡结构设计规范	传递系数法	铁路行业标准	显式
3	JTG D30 - 2015 公路路基设计规范	传递系数法	公路行业标准	显式、隐式
4	JTG/T 3334 - 2018 公路滑坡防治设计规范	传递系数法	公路行业标准	显式
5	GB 50021 - 2001 岩土工程勘察规范(2009 版)	传递系数法	国家标准	显式
6	GB 50330 - 2013 建筑边坡工程技术规范	传递系数法	国家标准	隐式
7	DZ/T 0219 - 2006 滑坡防治工程设计与施工技术规范	传递系数法	地矿行业标准	显式
8	DL/T 5353 - 2006 水电水利工程边坡设计规范	传递系数法 萨尔玛法	电力行业标准	隐式
9	SL 386 - 2007 水利水电工程边坡设计规范	摩根斯顿 - 普赖斯法 萨尔玛法 传递系数法	水利行业标准	隐式
10	GB 51289 - 2018 煤炭工业露天矿边坡工程设计标准	传递系数法	国家标准	隐式
11	GB 51016 - 2014 非煤露天矿边坡工程技术规范	萨尔玛法 传递系数法	国家标准	隐式
12	MHT 5027 - 2013 民用机场岩土工程设计规范	传递系数法	民航行业标准	隐式

部分规范的安全系数取值如表 2 所示。

表 2 各规范的安全系数取值表

序号	规范名称	推荐方法	安全系数取值	
			正常工况	非正常工况
1	建筑边坡工程技术规范 ^[1]	隐式解	1.25 ~ 1.35	1.05 ~ 1.15
2	铁路路基支挡结构设计规范 ^[2]	显式解	1.10 ~ 1.25	不低于 1.05
3	铁路特殊路基设计规范 ^[3]	显式解	1.10 ~ 1.25	不低于 1.05
4	公路路基设计规范 ^[4]	显式解	1.10 ~ 1.30	1.05 ~ 1.2

1 传递系数法的计算表达式

显式解法和隐式解法的推力表达式如式(1)和式(2)所示,显式解法把安全系数放在下滑力处,使下滑

力增加 K_x 倍;隐式解是把安全系数放在抗滑力处,使抗滑力减小 K_y 倍。

显式解(增大下滑力法):

$$T_i = K_x W_i \sin \alpha_i + \psi T_{i-1} - (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i)$$

(1)

其中,传递系数 $\psi = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i$

隐式解(强度折减法):

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + \psi T_{i-1} - \frac{W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i}{K_y}$$

(2)

其中,传递系数 $\psi = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} -$

$\alpha_i) \tan \varphi_i / K$
式中: T_i ——第 i 个条块末端的滑坡推力(kN);
 $K_x、K_y$ ——安全系数;
 W_i ——第 i 个条块滑体的重力(kN);
 α_i ——第 i 个条块所在滑动面的倾角($^{\circ}$);
 α_{i-1} ——第 $i-1$ 个条块所在滑动面的倾角($^{\circ}$);
 φ_i ——第 i 个条块所在滑动面上的内摩擦角($^{\circ}$);
 c_i ——第 i 个条块所在滑动面上的单位黏聚力(kPa);
 l_i ——第 i 个条块所在滑动面上的长度(m)。

2 传递系数法计算理论分析

本文对直线形和折线形滑面分别进行分析,以找出显式解和隐式解之间的关系。

2.1 直线型滑面

(1) 显式解与隐式解出口推力比值
当滑面为直线时, $\alpha_{i-1} - \alpha_i = 0$, 条块的倾角差均为 0, 滑体可视为整体简化计算。
传递系数 $\psi = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i = 1$, 由于不存在分块, 故 $T_{i-1} = 0$, 即 $\psi T_{i-1} = 0$ 。
则显式解与隐式解出口推力比值式(1)/式(2)可简化得:
$$\frac{K_x W_i \sin \alpha_i - (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i)}{W_i \sin \alpha_i - (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) / K_y} \quad (3)$$

当安全系数取同一个 K 时, 显式解与隐式解出口推力比值等于 K 。
(2) 显式解与隐式解安全系数的对应关系

显示解法和隐式解法相匹配的前提前件是使两种方法求解的出口推力相等, 即:

$$\frac{K_x W_i \sin \alpha_i - (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i)}{W_i \sin \alpha_i - (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) / K_y} = 1 \quad (4)$$

整理方程, 得

$$(K_x - 1) W_i \sin \alpha_i = (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) (1 - \frac{1}{K_y})$$

$$(K_x - 1) \frac{W_i \sin \alpha_i}{W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i} = 1 - \frac{1}{K_y} \quad (5)$$

设 $\frac{1}{K_w} = \frac{W_i \sin \alpha_i}{W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i}$ 则式(5)可转换为以下 3 个表达式:

$$1 - \frac{1}{K_y} = \frac{K_x - 1}{K_w} \quad (6)$$

$$K_y = \frac{1}{1 - (K_x - 1) / K_w} \quad (7)$$

$$K_x = 1 + K_w (1 - \frac{1}{K_y}) \quad (8)$$

式中: K_x ——显式解安全系数;
 K_y ——隐式解安全系数;
 K_w ——滑体当前稳定系数, $K_w = (N \tan \varphi_i + c_i l_i) / T$ 。

式(6)、式(7)和式(8)即为显式解和隐式解的对应关系, 3 个公式等效。由式(6)可知, $K_x、K_y$ 的关系与边坡当前的稳定系数 K_w 有关, 不同稳定系数的边坡其对应关系均不相同。而之前的研究基本上都忽略了这个因素, 只通过单纯研究 $K_x、K_y$ 之间的联系, 以期得到单一直接的对应关系, 故而未取得实质性进展。计算 $K_x、K_y、K_w$ 对应关系, 如表 3 所示。

表 3 $K_x、K_y、K_w$ 对应关系表

K_x	K_w									
	0.95	0.98	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35
	K_y									
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.05	1.056	1.054	1.053	1.05	—	—	—	—	—	—
1.1	1.118	1.114	1.111	1.105	1.1	—	—	—	—	—
1.15	1.188	1.181	1.176	1.167	1.158	1.15	—	—	—	—
1.2	1.267	1.256	1.25	1.235	1.222	1.211	1.2	—	—	—
1.25	1.357	1.342	1.333	1.312 5	1.294	1.278	1.263	1.25	—	—
1.3	1.462	1.441	1.429	1.4	1.375	1.353	1.333	1.316	1.3	—
1.35	1.583	1.556	1.538	1.5	1.467	1.438	1.412	1.389	1.368	1.35

注: 设计中安全系数取值需大于稳定系数, 才可以算出剩余下滑力, 故表中空格不列数据

表中第一行为稳定系数, 第一列为显式解安全系数, 中部为某个稳定系数下, 与显式解安全系数对应的隐式解安全系数, 这些均为设计中常见的系数。通过边坡稳定分析软件计算表中对应显式解与隐式解安全系数的滑坡出口推力, 结果表明两者计算出的出口推

力结果完全相等。这说明直线滑面时, 表 3 中的对应关系是正确的, 同时也验证了式(6)~式(8)的正确性。

在实际设计中, 通常假定滑坡稳定系数 $K_w = 1.0$, 通过反算得到滑面 $c、\varphi$ 值, 然后指定安全系数计算滑

坡推力,此时,可采用表4中隐式解与显式解安全系数的对应数据。若稳定系数不等于1.0,则建议采用表3进行内插或采用式(6)~式(8)进行计算来求得对应的隐式解与显式解安全系数。

表4 K_x 、 K_y 对应关系表(稳定系数等于1.0时)

显式解 K_x	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35
隐式解 K_y	1.0	1.053	1.111	1.176	1.25	1.333	1.429	1.538

(3) 滑体中部显式解与隐式解的推力关系

对于直线型滑面,取对应的显式解与隐式解安全系数,使两者的出口推力相等。当 $c=0$ 时,滑体中部的隐式解推力仍等于显式解,推力曲线完全重合。当 $c>0$ 时,滑体中部的隐式解推力小于显式解推力,隐式解推力曲线低于显式解推力曲线,如图1所示。

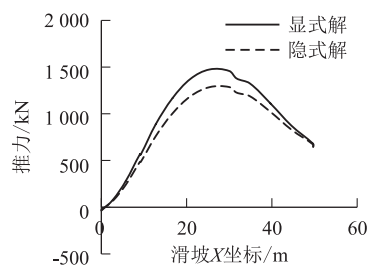


图1 某边坡显式解和隐式解的推力曲线图

8

2.2 折线型滑面

当滑面为折线型时,由于需考虑滑块间力的传递,得出简明直观的显式解和隐式解安全系数的对应关系表达式难度较大,本文尚未解决这一问题。但通过大量验算,总结规律如下:

(1)对于折线型滑面,对应关系式以下式表达:

$$K_y = \frac{\beta}{1 - (K_x - 1)/K_w} \quad (9)$$

式中: β ——折减系数,取值0.97~1.0。

折减系数取值与滑面形态、滑坡当前稳定性、安全系数取值等因素有关。通常当滑面弧度越大、滑坡当前稳定系数越大、安全系数取值越大时,采用的折减系数越小。

(2)当显式解与隐式解安全系数取值相同时,显式解与隐式解出口推力的关系如下:

①当安全系数为1时,显式解和隐式解的表达式完全相同,两者计算得出的滑体各点推力均相等。

②当安全系数小于1时,显式解的推力计算值小于隐式解计算值,两者比值大于安全系数。但实际设

计时安全系数不会小于1,因此此解无实际意义。

③当安全系数大于1时,显式解的推力计算值大于隐式解,两者推力比值一般小于安全系数。滑面越直,显式解与隐式解的出口推力比值越大,越接近指定的安全系数,当滑面为直线时,两者比值等于指定安全系数。

(3)当显式解与隐式解取不同的安全系数,使两者的出口推力相等时,滑体中部的隐式解推力小于显式解推力。

3 结束语

本文通过理论分析和大量计算,对边坡稳定性分析中传递系数法显式解和隐式解安全系数对应关系进行了研究,总结出了一些规律,对边坡设计有一定指导意义,建议规范转轨或实际设计时可采纳以下意见:

(1)对于直线型滑面,精确的安全系数对应关系值。应参考表3或式(6)~式(8),并结合滑体当前稳定系数选取或计算。

(2)对于折线型滑面,隐式解安全系数取值可在式(7)基础上进行折减,即按式(9)计算。折减系数取值0.97~1.0,折减幅度与滑面形态、滑坡当前稳定性、滑面抗剪强度取值、安全系数取值等因素有关。通常滑面弧度、滑坡当前稳定系数、安全系数取值越大时需采用的折减幅度越大。

(3)强度折减法数值分析时,可采用计算出的隐式解安全系数进行分析。

(4)显式解的安全系数取值为1.05~1.25时,其隐式解的建议取值为:直线型滑面取1.05~1.35;折线形滑面取1.05~1.35,并进行折减,折减系数0.97~1.0,中间值可按式(9)计算。

参考文献:

- [1] GB 50330-2013 建筑边坡工程技术规范[S].
GB 50330-2013 Technical Code for Building Slope Engineering[S].
- [2] TB 10025-2006 铁路路基支挡结构设计规范[S].
TB 10025-2006 Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade[S].
- [3] TB 10035-2018 铁路特殊路基设计规范[S].
TB 10035-2018 Code for Design on Special Subgrade of Railway[S].
- [4] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].
JTG D30-2015 Code for Design of Highway Subgrades[S].

(编辑:车晓娟 张红英)