

文章编号: 1005-0523(1999)01-0015-07

4. 5H 线和 36 线检算土坡稳定的误差分析

陆亦庄

(华东交通大学 土木工程系, 江西 南昌 330013)

摘要: 以土坡稳定最危险弧心轨迹线为依据, 对几种简单条件下土坡稳定系数偏差等值线进行计算, 得出危险心核及危险心轨迹带, 由此检查 4.5H 线和 36 线与轨迹带的差距, 并对这两种辅助线所计算的边坡稳定系数的误差进行分析, 指出其适用范围。

关键词: 土坡稳定; 误差分析; 危险心核; 轨迹带

中图分类号: U 213.13 **文献标识码:** A

0 引言

用圆弧条分法检算土坡稳定, 对于内摩擦角 Φ 不为零的粘性土坡, 据费伦纽斯研究认为: 最危险滑动圆弧的圆心将由 $\Phi = 0$ 时的圆心位置向上移动, 其移动轨迹可近似地看作一条直线, 这就是目前常用的 4.5H 线及 36 线法^[1,2]。笔者通过大量的计算, 已求出滑动圆弧通过坡脚时, 简单边坡的最危险圆心的轨迹线^[3,4], 证实它们与 4.5H 线或 36 线有较大的差距, 因此, 由 4.5H 线或 36 线求出的边坡稳定系数必然会有一定的误差, 但误差究竟有多大? 受哪些因素影响? 出现误差的范围有多大? 本文就此予以探讨^[13]。

1 边坡稳定系数的偏差等值线

当滑动圆弧通过坡脚时, 不同位置的圆心用圆弧法都能计算出其对应的边坡稳定系数 K 值, 其中只有一个心得出的 K 值最小, 即为边坡真正的稳定系数 K_{\min} , 此圆心为最危险圆心^[13]。在最危险圆心以外的各点, 所计算的 K 值是随着其与最危险心之间的距离的增大而增大的^[13]。这个增大量可用偏差 $\delta = K / K_{\min} - 1$ 来表示^[13]。将各相同 δ 的圆心连接起来, 就成为边坡稳定系数的偏差等值线, 它能反映出不同的圆心位置对 K 值计算结果影响的变化规律^[13]。计算并绘制各种边坡条件下的 δ 等值线是分析 4.5H 线和 36 线误差的基础^[13]。

δ 等值线分布形态除了与边坡坡度、高度、坡顶地面倾斜度及地面荷载情况等外界条件有关外, 还与土的物理力学性质有关, 特别是随着 $W = C / (\gamma \tan \Phi)$ 这个量而变化^[13]。当边坡外界条件一定时, 不论土体的容重 γ (kN/m^3)、内摩擦角 Φ 及粘聚力 C (kPa) 如何, 只要 W 值相同, 则其 δ 等值线也完全相同, 这一点与最危险圆心位置规律是一致的^[3,13]。

收稿日期: 1998-03-02; 修订日期: 1998-04-06

作者简介: 陆亦庄 (1940-), 男, 江苏苏州人, 华东交通大学土木工程系教授。

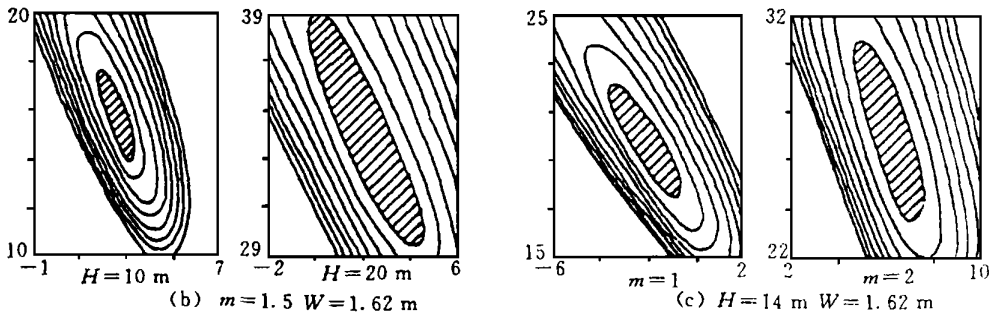
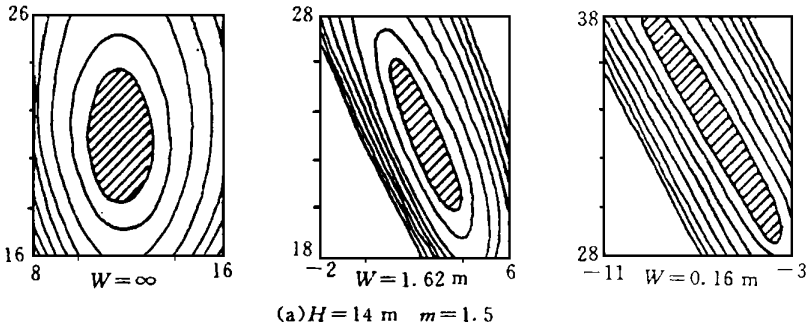


图1 坡顶地面水平,地面无荷载时 ξ 等值线

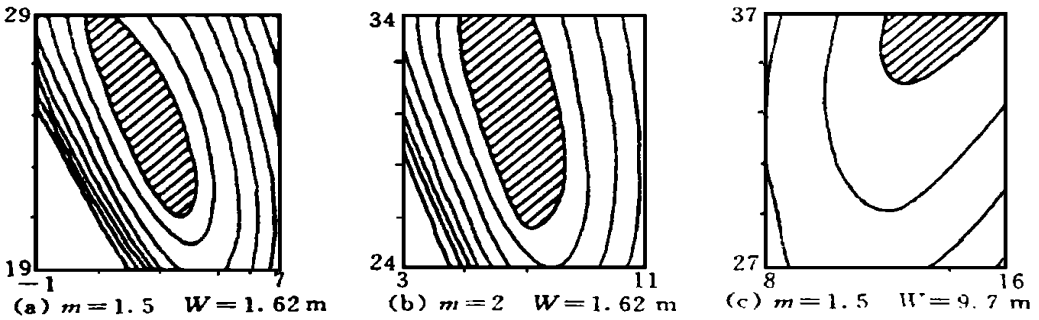


图2 坡顶地面倾斜,地面无荷载时 ξ 等值线($H=14\text{ m}$ $i=15^\circ$)

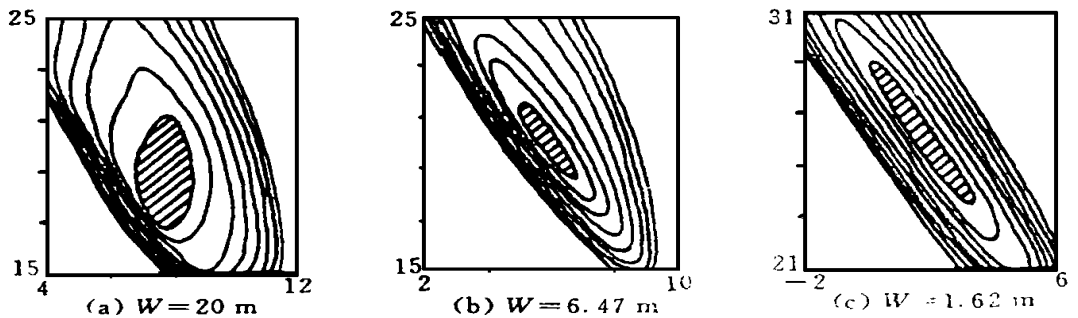


图3 坡顶地面水平,地面有荷载时 ξ 等值线($H=14\text{ m}$ $m=1.5$ 单线铁路路堤)

下面介绍简单边坡条件下,由计算机扫描计算绘出的 ξ 等值线的图形及其变化规律(图 1~3 中所绘等值线按 1% 的差向外递增,以坡脚为坐标原点)^[13]

1.1 坡顶地面水平、地面无荷载

1) ξ 等值线呈椭圆形分布,其形状及分布密度与 W 有关,也与边坡高度 H 和边坡坡率 m 有关^[13]

2) 当 H 及 m 不变时,随着 W 的减少(土的粘性减小),椭圆形长轴逐渐外倾,而且等值线形状变细、变长^[13]参见图 1(a)^[13]

3) 当 m 不变而 H 变化时,随着 H 的增大,等值线变宽、变长,线间距离加大^[13]不同 H 但只要 W 相同,等值线椭圆轴倾斜程度是非常接近的,参见图 1(b)^[13]

4) 当 H 不变而 m 变化时,随着 m 的增大(坡度变缓),椭圆轴倾斜度变小,线间距离加大,形状变宽、变长^[13]参见图 1(c)^[13]当 W 较小时,等值线椭圆轴接近于边坡垂直线的方向^[13]

1.2 坡顶地面倾斜、地面无荷载

1) 当 H 、 m 、 W 均不变时,随着地面倾斜角 i 增大, ξ 等值线形状变宽、变长,范围逐渐扩大(图 2(a) 与图 1(a) 比较)^[13]

2) 与地面水平时一样,当地面倾斜度相同, m 值的变大也会引起等值线形状变宽、变长,范围扩大(图 2(a) 与 2(b) 比较)^[13]

3) 相同边坡条件下,随着 W 的增大(土的粘性增大), ξ 等值线的范围也不断扩大,而且比地面水平时扩展得更大^[13]当 W 大到一定程度后,等值线已不再封闭(图 2(c)),此时最危险圆心会向上移至很远,甚至无法求得^[14]^[13]

1.3 坡顶地面水平、地面有均布荷载

ξ 等值线的形状与荷载分布有关,这里以单线铁路路堤(路基面宽 6.7 m、荷载土柱高 3.4 m,宽 3.5 m) 为例进行分析¹⁹

1) ξ 等值线呈细长条形(比无荷载时更细),椭圆长轴方向与边坡相垂直,与轨迹线方向一致(图 3(b) 和图 3(c))^[13]

2) 等值线椭圆形随着 W 的减小而变细、变长(图 3(c))^[13]

3) 当 W 较大时,椭圆形上大下小,线间距外密内疏(图 3(a) 和图 3(b))^[13]当 W 大到一定程度,最危险圆心会向直线轨迹线的右上方偏离^[3],这时 ξ 等值线向上有很大的扩展,形状也变得不太规则(图 3(a))^[13]

2 危险圆心核

在计算 ξ 等值线时可以看出,处在最危险圆心附近的圆心,虽然 K 大于 K_{\min} ,但相差甚小,因此在边坡稳定检算时,并不一定要非常准确地求出最危险圆心精确位置,只要圆心处于计算容许误差的范围内即可^[13]若容许误差定为 0.5%(满足设计要求),则危险圆心的范围就是 ξ 为 0.5% 的等值线所包围的区域,可把它称为危险圆心核^[13]于是寻求最危险圆心的位置就不再是一个点,而扩大成一个区域^[13]任何方法凡是所确定的圆心处于危险圆心核之内,即可认为其能满足检算精度要求,否则就存在一定的误差^[13]

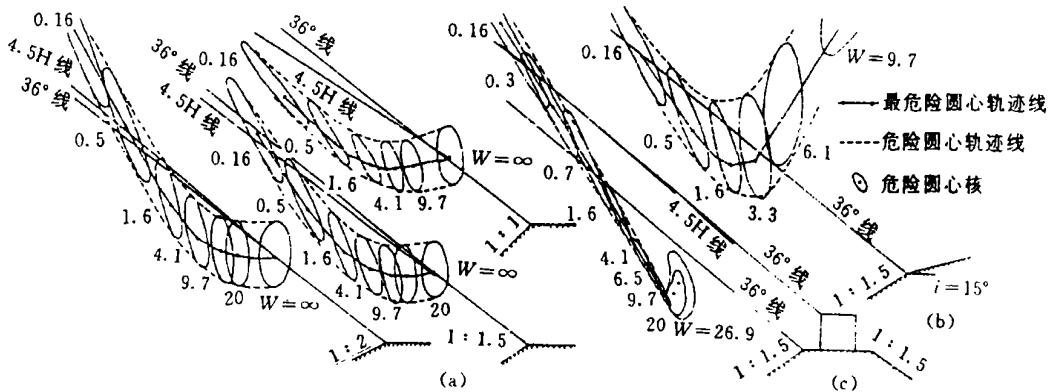
上述三种边坡条件下的危险圆心核,也在图 1~3 之中标出,图中阴影线部分即为危险圆

心核,其形状和变化规律与 Φ 等值线相同^[13]

3 危险圆心轨迹带

土坡最危险圆心的位置及危险圆心核的大小和形状均与 W 值有关^[13] W 是一个反映土的粘性程度的指标(单位为:米)^[13] 作为粘性土, W 值大致在 $0.2 \sim \infty$ 之间,其中轻亚粘土为 $0.2 \sim 0.7$;亚粘土为 $0.7 \sim 5$;粘土为 $5 \sim 12$; $W > 12$ 则为重粘土^[5]^[13]

将粘性土范围的各种不同 W 值的土体所计算出来的危险圆心核连续地绘在一起,就形成了一条以最危险圆心轨迹为中心的条带(各圆心核上、下缘包络的范围),称为危险圆心轨迹带^[13]图 4 为边坡高 14 m 时坡顶地面水平、坡顶地面倾斜及地面有均布荷载 3 种条件下轨迹带图形^[13]



(a) 地面水平(边坡 1:1 1:1.5 1:2) (b) 地面倾斜($i = 15^\circ$) (c) 地面有局部均布荷载(铁路路堤)
图 4 危险圆心轨迹带 ($H = 14\text{ m}$)

4 36°线的误差分析

如果 4.5H 线或 36°线无论在什么情况下,均全部处在危险圆心轨迹带之内,那么应该说这种简化方法是完全可行的^[13]但计算表明,事实上并非如此,4.5H 线或 36°线在不少情况下偏离于轨迹带以外,有时相差还比较远^[13]图 4 在绘出危险圆心轨迹带的同时,也绘出 4.5H 线和 36°线,可以比较分析^[13]

36°线是由 4.5H 线简化而来的,因其更为简单,使用也较广,本文先对其分析^[13]

1) 当坡顶地面水平,地面无荷载时,最危险圆心轨迹是一条以 $\Phi = 0 (W = \infty)$ 的圆心为始点(基本上在 36°线上),随着土体 W 的减小逐渐偏离 36°线,向边坡垂直平分线靠近的曲线^[3]^[13]现将轨迹线用轨迹带来取代,由图 4(a) 可见 36°线只有部分在轨迹带之内^[13]边坡愈陡,36°线离轨迹带愈远,误差愈大,产生误差的范围也愈大;反之,边坡较平缓时,由于轨迹线上移,圆心核变长,轨迹带变宽,36°线接近轨迹带,因此误差有所缩小^[13]

表 1 中列出了边坡高度为 14 m 的 36°线最大误差(距轨迹带最远点)及出现误差的土体范

围(13)计算表明, 边坡高度对最大误差的影响很小, 如边坡高度为 20 m、边坡 1: 1.5、 $W = 1.62$ m 时, 36° 线最大误差为 1.3%; 而边坡高度为 10 m 时, 最大误差为 1.5%, 二者相差甚微(13)

36° 线出现最大误差时对应的 W 值是随一边坡坡度不同而改变的(13)边坡较平缓时, 对于 W 值较小的土体 ($W < 0.2$ m), 其最危险圆心位置也会距 36° 线较远(在 36° 线以上), 但由于 W 较小, 圆心核变长, 故 36° 线与轨迹带仍较为接近, 计算误差往往不是最大的(13)

2) 当坡顶南面倾斜时, 随着地面倾斜度加大, 最危险圆心的轨迹向上移动, W 值愈大, 上移幅度愈大; 地面愈倾斜, 上移幅度也愈大, 有的甚至移到 36° 线以上较远处^[4](图 4(b)), 成为 36° 线出现最大误差的部位(W 值的上限)(13)危险圆心向上离 36° 线愈远, 其圆心核也愈大, 而且 δ 等值线间距也较宽(图 2c), 因此, 此时 36° 线的最大误差并不大(仅比地面水平时略大), 所出现误差的范围也不大(13)地面愈倾斜, 最大误差增大(i 大到一定程度时, 最大误差也会变小), 而误差范围却缩小, 参见表 1(13)

表 1 4.5H 线及 36° 线最大误差 ($H = 14$ m)

边坡条件		出现误差的 W 值范围 /m	最大误差时 W 值 /m	最大误差 δ_{\max}	
				36° 线	
				36° 线 (在边坡顶)	4.5H 线 (在边坡顶)
地面平 无荷载	1: 1	20 ~ 0.2	0.8	3.7	2.5
	1: 1.5	16 ~ 0.5	1.6	1.5	1.0
	1: 2	10 ~ 2.5	4.0	0.8	0.9
地面倾斜 边坡 (1: 1.5)	$i = 5^\circ$	202 ~ 100	202	0.9	1.2
	$i = 10^\circ$	20 ~ 14	20	1.0	1.4
	$i = 15^\circ$	10 ~ 6	10	2.3	2.4
	$i = 20^\circ$	4 ~ 3	4.0	1.8	1.9
地面平 有荷载	1: 1	27 ~ 0.3	6.5	4.7	4.4
	1: 1.5	27 ~ 0.6	6.5	3.9	3.3
	1: 2	20 ~ 1.6	6.5	2.5	2.7

3) 当坡顶地面作用有外荷载时, 最危险圆心的轨迹是处在边坡的垂直线上^[3], 轨迹带呈狭长直线形条带(图 4(c)), 与 36° 线交叉, 二者差距明显(13)轨迹带上、下端最危险圆心都远离 36° 线, 但上端点由于 W 较小, 圆心核变长, 范围扩大, 故 36° 线误差并不大; 而下端点因 W 较大, 圆心核较小, 因此是 36° 线出现最大误差的控制部位(13)不过需要指出, 当 W 大到一定程度后, 由于危险圆心不在直线轨迹上, 而向右上方偏离, 圆心核也随之扩大, 靠近 36° 线, 此时 36° 线误差将会减小(13)

表 1 中也列出了单线铁路路堤 36° 线的最大计算误差(13)

计算表明最大误差主要与边坡坡度有关, 边坡愈陡, 误差愈大(13)当然对于填筑路堤, 一般情况下粘性土边坡是不可能为 1: 1 的, 这里列出计算结果仅表示坡度对误差影响的规律(13)边坡高度也会对误差有一些影响, 边坡增高时, 轨迹带下端点距 36° 线较远, 但圆心核却扩大, 因此误差反而比低边坡减小(13)边坡愈低, 误差愈大, 如 $H = 6$ m、1: 1.5 的边坡, 36° 线最大误差可达 12%(13)

地面有荷载时, 4.5H 线或 36° 线通常是由土柱顶来作图的^[2], 看起来似乎有一定道理, 相当于把边坡加高了(13)但通过计算发现这样做却并不合适, 因为对于不同 W 值的土体, 在荷载影

响下,最危险圆心并非都是向上移动的,从图5中可看出 $H = 14\text{ m}$ 、 $1:1.5$ 的边坡,当 $W < 5\text{ m}$ 时,荷载引起最危险心向上移动;但 $W = 5 \sim 20\text{ m}$ 时,荷载却使最危险心向下移动,而这一部分恰为 36° 线的最大误差范围(13)因最危险心的下移,已使最大误差比无荷载时有所增大(表1),若再将 36° 线由坡顶上移至柱顶,则误差会更大(大约再增大4%)(13)

5 4.5H 线的误差分析

4.5H 线与 36° 线不同之处在于前者是随着边坡的坡度而变化的,坡度较陡时 4.5H 线比 36° 线平缓,处在 36° 线以下;而坡度较平缓时,4.5H 线陡于 36° 线,在 36° 线以上(13)这种变化与最危险圆心轨迹上移有相似之处,因此通常认为 4.5H 线的计算误差小于 36° 线,但事实上也只有当在边坡约陡于 $1:1.75$ 的情况下(由坡顶作图)才如此(13)当边坡缓于 $1:1.75$ 后,由于最危险圆心基本上在 36° 线以下,故 4.5H 线的抬高必然使其大于 36° 线的误差(13)与此相反,当地面倾斜时,由于最大误差的危险圆心移到 36° 线以上,故陡于 $1:1.75$ 的边坡其 4.5H 线也要比 36° 线的误差大(13)

4.5H 线误差的规律基本上与 36° 线相同,其最大误差计算结果也对应地列于表 1 中(13)

6 结 论

通过上述分析,可以得出以下结论:

- 1) 坡顶地面水平时,4.5H 线或 36° 线最大误差往往在亚粘土边坡中出现,其大小及误差范围与边坡坡度有关(13)边坡愈平缓,误差愈小,产生误差的土体性质范围也愈小(13)当边坡缓于 $1:2$ 以后,可认为已不存在误差(13)至于边坡高度则对误差影响甚小(13)
- 2) 地面倾斜时,4.5H 线或 36° 线最大误差往往在粘性较大的土中出现,地面愈倾斜,误差愈大(13)边坡坡度及高度对误差的影响较小(13)
- 3) 地面若作用有局部均布荷载(铁路路堤),当 4.5H 线或 36° 线由土柱荷载顶作图时,其误差一般均较大,最大误差可达 $6\% \sim 12\%$,往往出现在 W 值为 $5 \sim 12$ 的粘土范围中(13)边坡愈低,误差愈大;边坡愈陡,误差也愈大(13)
- 4) 4.5H 线误差并非一概小于 36° 线误差(13)
- 5) 4.5H 线与 36° 线这两种简化方法,比较适合于地面无荷载的条件,一般情况下最大误差小于 3% (13)若用于地面作用有局部荷载时,这两种辅助线还是仍由边坡坡顶边缘来作图更为合适,可使误差大为减小(13)

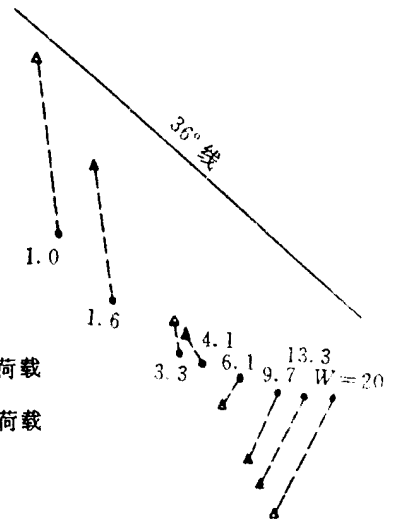


图5 地面荷载引起最危险圆心的移动

[参 考 文 献]

- [1] 武汉水利电力学院编. 土力学及岩石力学(新版)[M]. 北京:水利电力出版社, 1982. 161~165
- [2] 铁道部第一勘测设计院编. 铁路工程设计技术手册——路基[M]. 北京:中国铁道出版社, 1995. 10~18
- [3] 陆亦庄. 土坡稳定分析瑞典法最危险圆弧圆心轨迹的探求[J]. 路基工程, 1997, (2): 3~10
- [4] 陆亦庄. 倾斜地面路堑边坡稳定最危险圆弧的圆心轨迹[J]. 路基工程, 1997, (6): 5~8
- [5] 天津大学编. 地基与基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1978, 243

Error Analysis of line 4.5H and line 36° Calculate Slope Stability

LU Yi-zhuang

(Civil Eng. Depa., East China Jiaotong Univ. Nanchang, 330013, China)

Abstract: According to the locus line of center point of the most dangerous circle of slope stability, the author calculates coefficient deviation equivalent lines of slope stability in several simple conditions and gets the dangerous circular kernel and the locus ribbon dangerous center point. Then the author examines the deviation distance between Line 4.5H, Line 36° and the locus ribbon. Finally, the paper analyzes the error of coefficient of side slope stability calculated by two assistant lines and points out the applicable scope of two assistant lines.

Key words: slope stability; error analysis; dangerous circular kernel; locus ribbon