

图 4-5 直线破裂法验算图之三(成层非均质砂类土路堑)

c_i ——第 i 个土层的单位粘聚力, kPa;

ω ——破裂面的倾斜角 $^\circ$;

l_i ——第 i 个条块下破裂面分段的长度, m。

假定 3~4 个可能的破裂面, 按式(4-8)求出其相应的几个 K 值, 并绘出 $K=f(\omega)$ 曲线及其水平切线(仿照图 4-3c), 以确定最小稳定系数 K_{\min} 值。

若路堤用强度指标不同的几种砂类土分层填筑, 其边坡稳定系数的计算亦可按上法进行。但应注意, 某一分块上如有换算土柱荷载, 则该分块的 Q_i 应包括换算土柱荷载在内。

第三节 圆弧法验算之一(分段法)

分段法又叫条分法或分块法。是圆弧法中最常用的一种方法。

一、计算公式

设滑动面为如图 4-6 所示的 AB 弧, 将 AB 弧上可能滑动的土体划分为若干小段, 分段愈多则计算结果愈精确, 一般为 8~10 段。小段的划分, 还可结合横断面特征, 如分在边坡或地面坡度变化之处, 以便计算简化。

在任一小段的可能滑动面上, 则有 Q 力作用着(包括小段土重和其上部换算为土柱的荷载在内)。 Q 可分解为垂直于小段滑动面的法向分力 $N = Q \cos \alpha$ 和切于该面的切向分力 $T = Q \sin \alpha$, 其中 α 为该弧段中心点的半径线与通过圆心的竖线之间的夹角, $\alpha = \sin^{-1} \frac{X}{R}$ (其中 X 为弧段中心点距圆心竖线的水平距离, R 为圆弧半径)。每一小段的可能滑动面上的反力(抵抗力)为: 内摩擦力 fN (其中 $f = \tan \phi$) 和粘聚力 cl (其中 l 为小段弧长)。但

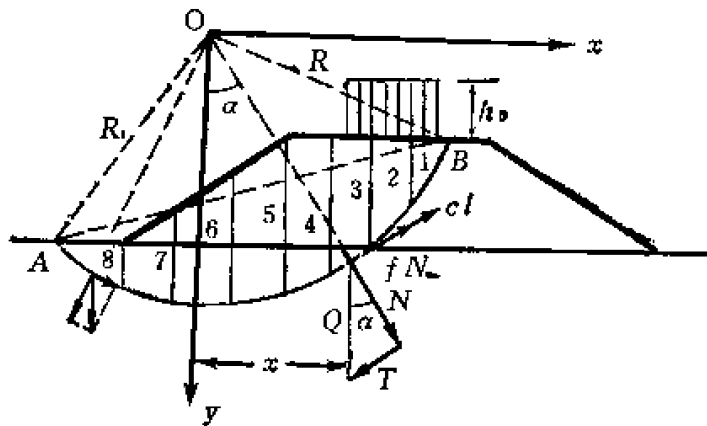


图 4-6 分段法验算法计算图

应注意,图 4-6 中竖线以左各小段的 Q 所产生的切线分力,其方向向右,是起抗滑作用,抵消部分滑动力。

因此,绕圆心 o 的抵抗力矩为

$$M_{\text{抵抗}} = (\sum fN + \sum cl)R$$

绕圆心 o 的滑动力矩为

$$M_{\text{滑动}} = (\sum T_{\text{滑动}} - \sum T_{\text{抗滑}})R$$

两力矩之比,约去 R ,得稳定系数为

$$K = \frac{\sum fN + \sum cl}{\sum T_{\text{滑动}} - \sum T_{\text{抗滑}}} \quad (4-9)$$

应绘若干个滑坍圆弧,依上法求出每个稳定系数 K ,从中得出最小的 K_{\min} 值。各滑弧的圆心位置,可采用辅助线的方法确定。

二、确定辅助线

1. 方法(见图 4-7)

1) 方法一

如图 4-7a),由坡脚 E 向下引竖线,在竖线上截取高度 H , H 值包括土坡高度及荷载换算为土柱的高度 h_0 在内。

按上法得出 F 点后,由 F 点向右引水平线,在水平线上截取 $4.5H$,得 M 点。

连接边坡坡脚 E 和顶点 S ,求 SE 的斜度 $i_0 = \frac{1}{m}$,并据此由表 4-1 查得 β_1 和 β_2 的角值。由 E 点引与 SE 成 β_1 角的直线 EI ;又由顶点 S 引与水平线成 β_2 角的直线 SI 。 EI 与 SI 两直线相交于 I 点,联接 I 和 M 两点即得圆心辅助线。

如土仅具粘聚力,则圆心就在 I 点上;如土除粘聚力外尚具内摩擦力,则破裂圆弧在辅助线上的圆心将随 ϕ 值的增加向外移(离开边坡)。

2) 方法二

作法同于方法一,所不同的只是 H 不包括荷载换算土柱高而是坡高, i_0 按边坡坡脚、

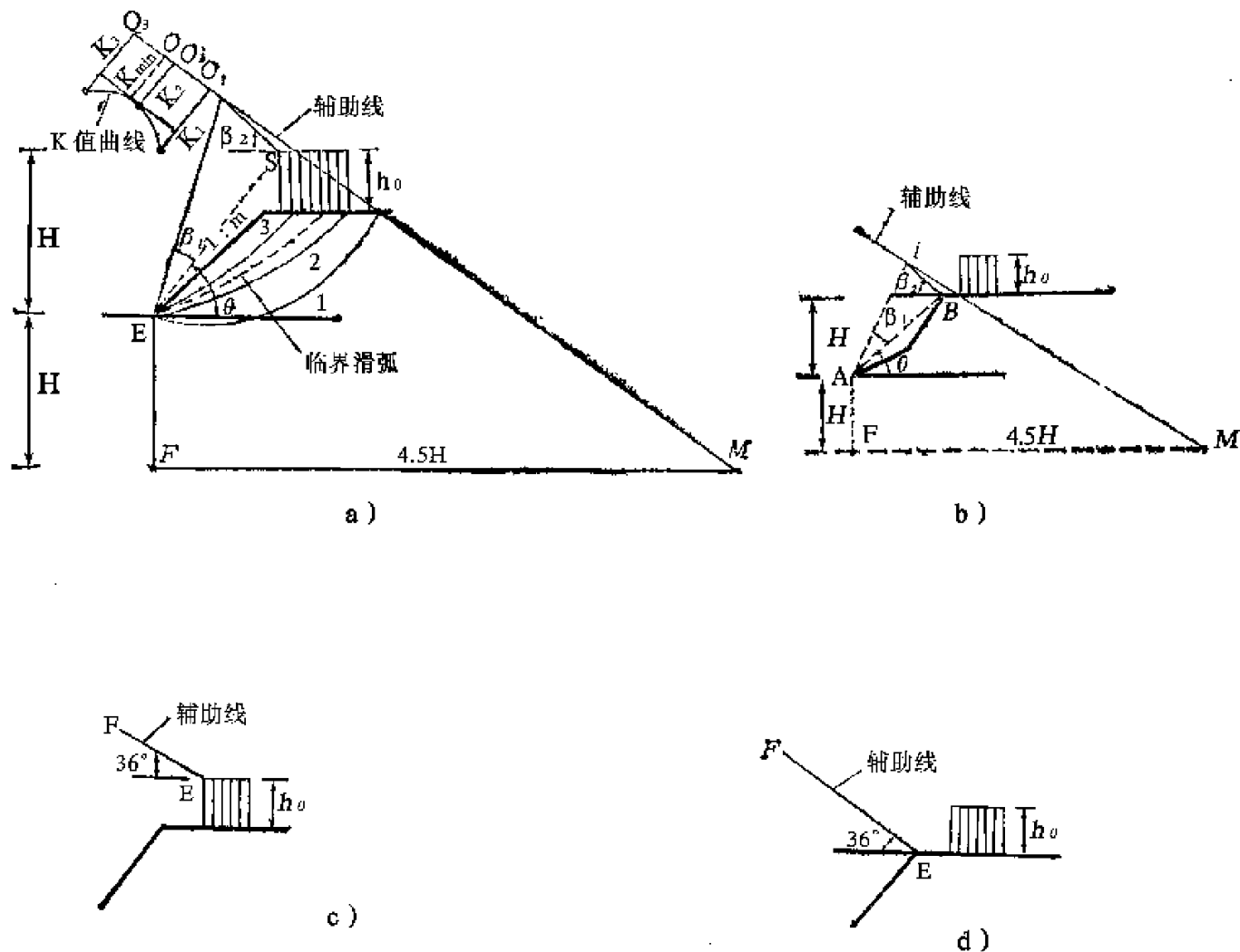


图 4-7 确定辅助线
a)方法一;b)方法二;c)办法三;d)方法四

坡顶的连线 AB 与水平线的夹角来计算,见图 4-7b), β_1 、 β_2 仍由表 4-1 查得。

3) 方法三

由荷载换算土柱高顶点 E 作与水平线成 36° 角的 EF 线,如图 4-7c)所示、此法相当于方法一的简化。

4) 方法四

同方法三,所不同的是取 E 点于坡顶处,如图 4-7d)所示,此法相当于将方法二的简化。

上述四种确定辅助线的方法,对于计算结果,出入不大,均可采用。为求简便,一般常用 36° 线法。但方法一、方法二较精确,且求出的稳定系数 K 之值较小,故适用于验算重要建筑物(如土坝等)的稳定性。

2. 相关角值的关系

表 4-1 是均质高塑性粘土($\phi = 0$)边坡分析所得的结果,其破裂面通过坡脚,坡顶面为水平,如图 4-8 所示

表 4-1 通过坡脚的最危险破裂圆弧中心位置的有关角值($\phi=0$ 粘土边坡)

边坡斜度 i_0	边坡倾斜角 θ	α	ω	β_1	β_2
1: 0.5	63°26'	33°15'	37°	29°30'	40°
1: 0.75	53°18'	40°	32°15'	29°	39°
1: 1	15°00'	45°	28°15'	28°	37°
1: 1.25	38°40'	48°30'	25°	27°	35°30'
1: 1.5	33°41'	51°15'	22°15'	26°	35°
1: 1.75	29°45'	53°15'	20°	26°	35°
1: 2	26°34'	55°	18°	25°	35°
1: 2.25	23°58'	56°	16°30'	25°	35°
1: 2.5	21°48'	57°	15°15'	25°	35°
1: 3	18°26'	58°45'	13°15'	25°	35°
1: 4	14°03'	60°45'	10°15'	25°	36°
1: 5	11°19'	62°	8°15'	25°	37°

图 4-8 中土楔 $AFDB$ 沿假定圆弧破裂面 AFD 滑动,对于破裂圆弧中心 O 的滑动力矩和抵抗力矩为

$$\begin{aligned}
 \text{滑动力矩 } M_s &= M_{\triangle AHD} - M_{\triangle AHB} + M_{\triangle AFD} \\
 &= \frac{\gamma h^2 \text{ctg} \omega}{2} \left(\frac{h}{2} \text{ctg} \alpha - \frac{h}{6} \text{ctg} \omega \right) \\
 &\quad - \frac{\gamma h^2 \text{ctg} \theta}{2} \left(\frac{h}{2} \text{ctg} \alpha - \frac{h}{2} \text{ctg} \omega + \frac{h}{3} \text{ctg} \theta \right) \\
 &\quad + \frac{\gamma h^3}{12 \sin^2 \omega} (\text{注})
 \end{aligned}$$

(注)1. 弧块 AFD 的面积 $A_{\triangle AFD} = \frac{1}{2} R^2 (2a - \sin 2a)$,

$A_{\triangle AFD}$ 形心 K 点距圆心 O 的距离为 $y_d = \frac{4}{3} R \cdot \frac{\sin^3 a}{2a - \sin 2a}$ (见注 2), 则弧块重心距圆心竖线的水平力臂为

$a = y_d \sin \omega$, 故得

$$M_{\triangle AFD} = \gamma A \cdot a = \frac{\gamma h^3}{12 \sin^2 \omega}。$$

弧面的面积(A)及其形心(或土块重心)距边缘的距离(y, x)如下表:

断面简图	断面面积(A)	图示轴线至边缘距离 (y, x)
见图 4-7b	$A = \frac{R^2}{2}(2a - \sin 2a)$	$y_d = \frac{4R}{3} \cdot \frac{\sin^3 a}{2a - \sin 2a}$ $y_1 = R - y_d$ $y_2 = R(1 - \cos \alpha) - y_1$ $x = R \sin \alpha$

(本表取自建筑设计手册《静力计算》，中国工业出版社，1970 年。)

抵抗力矩 $M_R = cL \cdot R = c \cdot 2aR^2$ (其中 $R = \frac{h}{2\sin\alpha\sin\omega}$)

$$= \frac{c \cdot \alpha \cdot h^2}{2\sin^2 \alpha \sin^2 \omega}$$

当土楔处于极限平衡状态时，抵抗力矩与滑动力矩相等 ($M_R = M_s$) 从而得出

$$c = \gamma h \left[\frac{\sin^2 \alpha \sin^2 \omega}{2\alpha} (\operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \omega - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \theta + \operatorname{ctg} \theta \operatorname{ctg} \omega - \frac{2}{3} \operatorname{ctg}^2 \theta + \frac{1}{3}) \right] \\ = \gamma h \cdot F(\theta, \alpha, \omega) \quad (4-10)$$

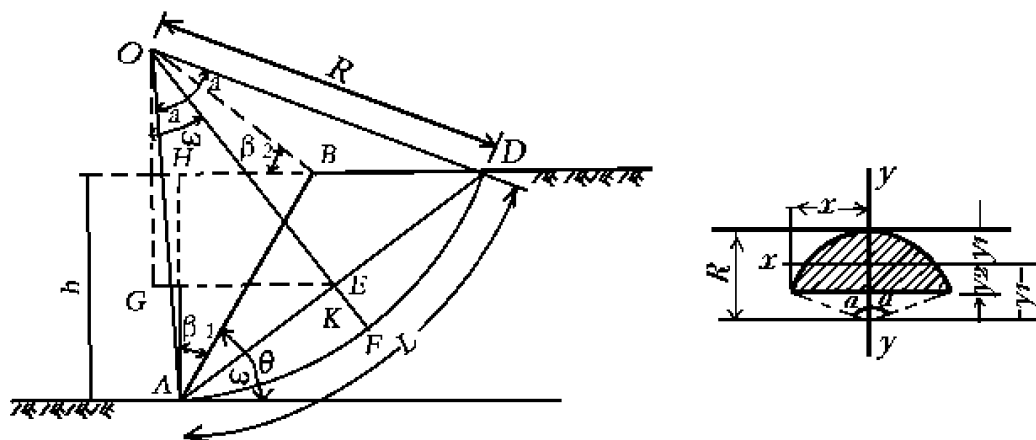


图 4-8 圆弧破裂法验算图(均质高塑性粘土)

土坡稳定系数可按下式计算

$$K = \frac{c}{\gamma h} \cdot \frac{1}{F(\theta, \alpha, \omega)} \quad (4-11)$$

以上各式中，除土体的物理力学性质指标 r 及 c 外，其余符号意义见图 4-8。

对于最危险的破裂圆弧其稳定系数为最小，则函数 $F(\theta, \alpha, \omega)$ 应为最大。以 α 及 ω 为变数，对此函数求最大值。

由 $\frac{\partial F}{\partial \omega} = 0$ ，得

$$\operatorname{tg} 2\omega = \frac{3\operatorname{tg} \theta + (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \theta)}{3\operatorname{tg} \theta + 2\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg}^2 \theta} \quad (4-12)$$

由 $\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0$ ，得

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \theta) \sin \alpha \cdot (2 \alpha \cos \alpha - \sin \alpha) - \alpha \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta}{\sin \alpha (2 \alpha \cos \alpha - \sin \alpha) \left(1 + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{3 \operatorname{tg} \theta} - \frac{1}{3} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta\right) - \alpha \operatorname{tg} \alpha} \quad (4-13)$$

对于一系列给定的边坡倾斜角 θ , 从式(4-12)及式(4-13), 运用试算法可求出相应的最危险破裂面的 α 和 ω 值。图 4-9 为按试算结果绘制的图解。

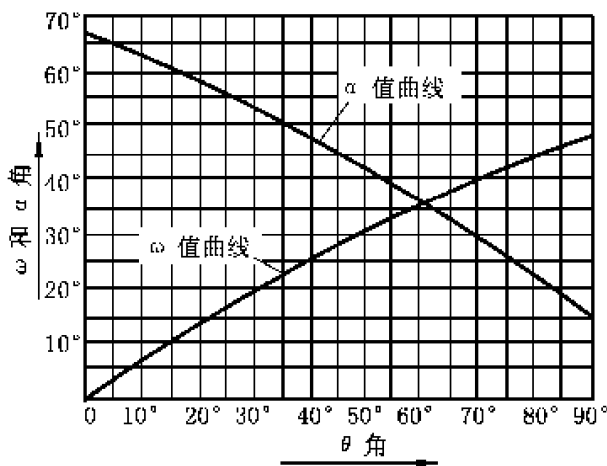


图 4-9 通过城脚的最危险破裂圆弧的 α 和 ω 值图解($\phi=0$ 粘土边坡)

为了便于寻找最危险破裂圆弧的圆心位置, 对于一些常用的边坡倾斜角 θ , 根据图 4-9 查得的 α 和 ω 值来求算角 β_1 和 β_2 值, 并列于表 4-1。

三、临界圆弧圆心位置的确定

1. 根据人工边坡或天然斜坡外形, 结合荷载情况, 将各个可能滑弧的两端点连成直线, 并在该直线上作中垂线与辅助线相交, 所得各交点即为各可能滑弧的圆心。

2. 或先在辅助线上试标出一系列可能滑弧的圆心 O_1 、 O_2 、 O_3 等, (如图 4-6a), 通过坡脚(或坡上或坡脚外可能破坏点)绘出滑弧, 判断其是否为可能滑动面。如不合适, 则调整圆心位置再作弧, 直至认为所绘出的滑动弧为最不利时为止。

按式(4-7)计算出每一滑动土体的稳定系数, 并绘出 K 值曲线, 如图 4-6a)。然后绘平行于辅助线且切于 K 曲线的直线, 即得切点, 由切点向辅助线作垂线, 垂线与辅助线的交点 O , 即为临界圆心, 从此圆心所作之弧即为临界圆弧(亦即最危险的破裂面)。

例题 4-1 已知: 路堤高 13m, 顶宽 10m, 其横断面初步拟定如图 4-10 所示。路基填土为亚粘土, 土的粘聚力 $c=10\text{kPa}$, 内摩擦角 24° ($\operatorname{tg} \phi=0.45$), 容重 $r=17\text{kN/m}^3$, 荷载为挂车—80(1 辆车重力 800kN)。试算其稳定性。

解

1. 用方格纸以 1: 50 比例尺绘出路堤横断面。

2. 将挂车—80 换算成土柱高(当量高度)。设其中一辆挂车停歇在路肩上, 而另一辆以最小间距 $d=0.4\text{m}$ 与它并排。按式(4-1), 则换算土柱高为

$$h_0 = \frac{NQ}{LB_\gamma}$$

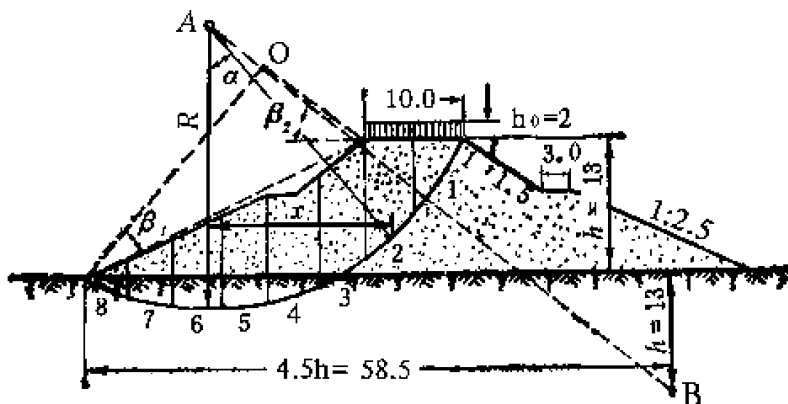


图 4-10 以分段法验算边坡稳定性例题(单位:m)

式中: L ——纵向分布长度(等于纵向各轴距之和), $L=6.4\text{m}$;

B ——横向分布最外轮外缘之间总距,m,

$$B = Nb + (N - 1)d,$$

其中: N 为车辆数,等于2; d 为车身之间的净距,等于0.4m; b 可近似地取为车身的宽度,等于3.5m,则

$$B = 2 \times 3.5 + 0.4 = 7.4(\text{m})$$

$$\text{故 } h_0 = \frac{2 \times 800}{6.4 \times 7.4 \times 18} = 2(\text{m})$$

3. 为了定出滑动曲线中心,须先定出辅助线(各中心均在此直线上)。本例按前述方法二,将坡顶坡脚连成一直线,如图4-10中虚线所示,此线倾斜角 $\theta = 25^\circ$ 。从表4-1得,辅助角 $\beta_1 = 25^\circ$, $\beta_2 = 35^\circ$,据此两角分别自坡脚和右顶点作直线相交于 O 点,滑动曲线的圆心,即在 BO 的延长线上。

4. 绘出三条不同位置的滑动曲线:(1)一条通过路基中线;(2)一条通过路基的右边缘;(3)一条通过距右边缘的1/4路基宽度处。

图中是以第2条曲线(通过右边缘)为例。

5. 为了找到曲线中心,可用直线连接坡脚与右边缘,并在此直线的中点处引一垂直线。此垂直线与 BO 的引长线相交于 A 点, A 即是滑动曲线中心。

6. 将圆弧范围土体分成8~10段,本例采用8段,先由左坡脚起每5m一段,最后一段可能略小。

7. 算出滑动曲线每一分段中点与通过圆心的竖线之间的偏角 α

$$\sin \alpha = \frac{X}{R}$$

式中: X ——分段中点距圆心竖线的水平距离,圆心竖线左侧为负,右侧为正;

R ——滑动曲线半径。

计算结果见表4-2。

8. 每一分段的曲线形底部可近似取直线可将各段图形化简成为梯形或三角形,用求积仪等方法将其面积 Ω 量出,其中包括荷载换算成土柱部分的面积在内。

9. 计算稳定系数时,是以路堤1m长为准。各分段面积乘土的单位重力,即得分段的

重力 Q 。

10. 将每一分段的重力 Q 化为二个分力：

a、在滑动曲线的法线方向分力为： $N = Q\cos\alpha$

b、在滑动曲线的切线方向分力为： $T = Q\sin\alpha$

并求出此两者的总和 ΣN 和 ΣT ，如表 4-2 所示。

表 4-2 以分段法验算边坡稳定性

分 段	$\sin\alpha$	α	$\cos\alpha$	Ω (m^2)	$Q = \Omega\gamma$ (kN)	$N = Q\cos\alpha$ (kN)	$T = Q\sin\alpha$ (kN)	L (m)
1	0.85	$58^\circ00'$	0.53	29.90	508.0	269.0	432.0	45.20
2	0.64	$39^\circ40'$	0.77	57.50	976.0	752.0	624.0	
3	0.47	$28^\circ00'$	0.88	56.00	950.0	835.0	446.0	
4	0.28	$16^\circ30'$	0.96	51.00	866.0	832.5	242.2	
5	0.11	$6^\circ20'$	0.99	49.75	845.0	837.0	93.0	
6	-0.07	$-4^\circ00'$	0.99	38.50	653.5	647.0	-45.6	
7	-0.27	$-15^\circ40'$	0.97	24.00	407.0	394.5	-110.0	
8	-0.37	$-21^\circ40'$	0.93	4.80	81.5	75.8	-30.2	
						$\Sigma N =$ 4642.8	$\Sigma T =$ 1651.4	

11. 用比例尺量出滑动曲线之长 L 。

12. 按下式求第 2 条曲线的稳定系数

$$K_2 = \frac{f\Sigma N + cL}{\Sigma T}$$
$$= \frac{0.45 \times 4642.8 + 10 \times 45.2}{1651.4} = 1.54$$

用同样方法，还可求出另两条滑动曲线的稳定系数：

$$K_1 = 1.47$$

$$K_3 = 1.76$$

由于第 1 条曲线(通过路基中线)的稳定系数最小而又是最靠左边，因此在左边缘与路基中线之间的中点再绘一条滑动曲线并计算其稳定系数

$$K_0 = 1.49 > 1.47$$

由此可见，第 1 条曲线为最危险的(临界的)滑动面，但其稳定系数接近于 1.5，因此本例所采用的边坡斜度，足以保证路基的稳定性。

第四节 圆弧法验算之二(公式计算法)

一、计算公式

取高度为 h 、宽为 dx 、长为 1m 的微分土体、其容重为 γ , 底部弧段中点距 y 轴的夹角为 α (见图 4-11), 则土重

$$dQ = \gamma h dx$$

法线分力 dN 与切线分力 dT 分别为

$$dN = \gamma h dx \cos \alpha$$

$$dT = \gamma h dx \sin \alpha$$

图 4-11b 中土条 $abed$ 的两个分力为

$$N = \int_0^N dN = \int_{x_1}^{x_2} \gamma h \cos \alpha \cdot dx \quad (\text{a})$$

$$T = \int_0^N dT = \int_{x_1}^{x_2} \gamma h \sin \alpha \cdot dx \quad (\text{b})$$

式中:

$$dx = (R d\alpha) \cos \alpha \quad (\text{c})$$

$$h = R \cos \alpha - (t - \Delta y) \quad (\text{d})$$

其中: R ——滑弧的半径;

t ——边坡引长线在 y 轴的截距;

Δy ——微分土条顶部与边坡在 y 轴截点之间的距离。

设 θ 为边坡坡度系数(纵: 横), m 为边坡斜度系数(横: 纵), 两者互为倒数, 即

$$\theta = \frac{1}{m}$$

由图 4-11, $\theta = \frac{\Delta y}{x} = \frac{1}{m}$, 其中 $x = R \sin \alpha$, 故

$$\Delta y = \theta x = \theta R \sin \alpha$$

代入式(d), 得

$$h = R \cos \alpha - t + \theta R \sin \alpha \quad (\text{e})$$

将式(c)及(e)的 dx 及 h 值代入式(a)及(b), 得

$$N = \int_{x_1}^{x_2} \gamma h \cos \alpha dx = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \gamma R \cos^2 \alpha (R \cos \alpha - t + \theta R \sin \alpha) d\alpha$$

$$\text{和} \quad T = \int_{x_1}^{x_2} \gamma h \sin \alpha dx = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \gamma R \sin \alpha \cos \alpha (R \cos \alpha - t + \theta R \sin \alpha) d\alpha$$

式中: α_1 、 α_2 ——见图 4-11b), 为弧段始点 α 与终点 d 各自的半径线距 y 轴的夹角。

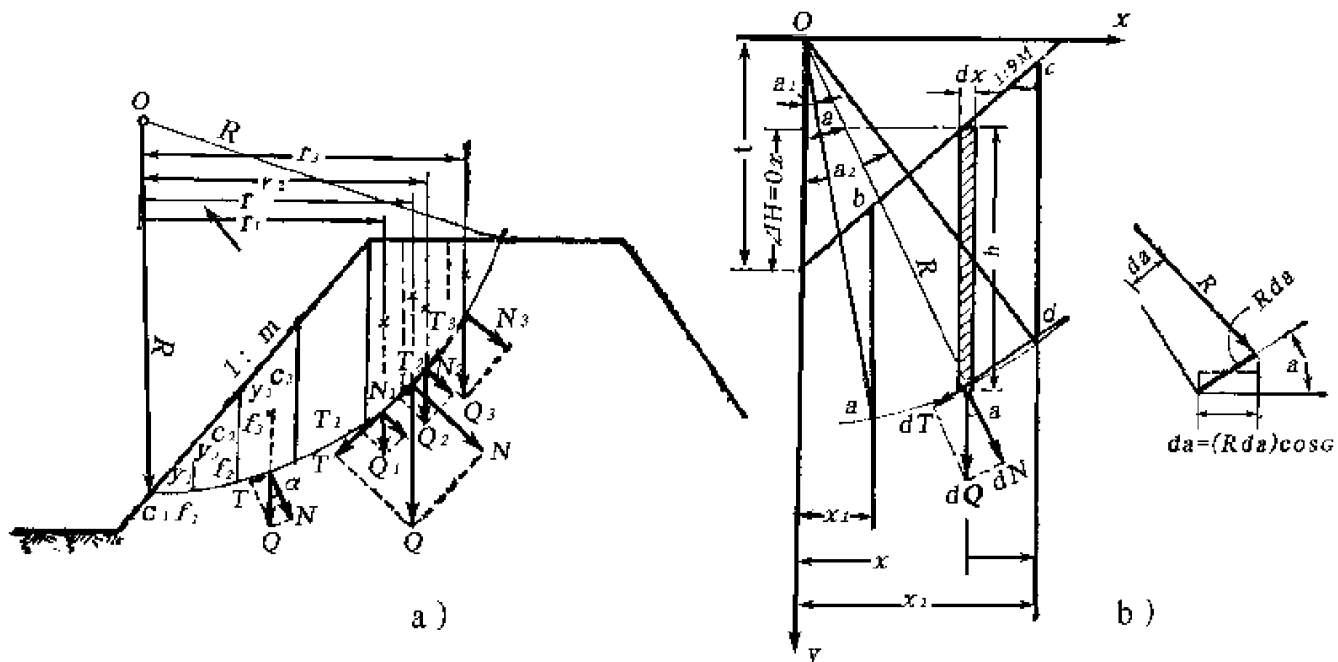


图 4-11 滑动土块受力分析

上两式经过积分后得

$$N = \frac{\gamma R^2}{6} \{ (5 + \cos 2\alpha_2 - (5 + \cos 2\alpha_1) \sin \alpha_1) - \frac{3t}{2R} [(\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) + 2(\alpha_2 - \alpha_1)] + \theta [\cos \alpha_1 (1 + \cos 2\alpha_1) - \cos \alpha_2 (1 + \cos 2\alpha_2)] \} \quad (4-14)$$

$$T = \frac{\gamma R^2}{6} \left[(1 - \cos 2\alpha_1) \left(\frac{3t}{2R} \cos \alpha_1 - \theta \sin \alpha_1 \right) + 2 \cos \alpha_1 - (1 - \cos 2\alpha_2) \left(\frac{3t}{2R} - \cos \alpha_2 - \theta \sin \alpha_2 \right) - 2 \cos \alpha_2 \right] \quad (4-15)$$

如滑弧以上土体划分为数段,经用上法求出每段土块的 N 、 T 及 cl 后,即可用下式求稳定系数

$$K = \frac{\sum N t g \phi + \sum cl}{\sum T} \quad (4-16)$$

二、注意事项

1. 在进行计算时,要求依图确定 R 、 α 、 t 和 θ 值,其中 R 是直接由图量得, α 不宜用圆规直接量得,而是通过下式计算: $\sin \alpha = \frac{x}{R}$ 。 t 是边坡引长线与 y 轴交点的纵距,可按图量取(亦可计算)。

当堤顶有荷载时,则应由换算土柱高 h_0 的顶部绘横线取 t (相当于由堤顶绘横线所截取的 t 减去 h_0)。

2. 如各层土的性质不同,可在各层分界线与滑弧的交点(如图 4-12 的 b、c、d)向上绘竖线划分为块。 γ 、 c 、 ϕ 则取各该土层的试验数据(例如对于 $bcgf$ 块, c 、 ϕ 取第 2 层的数据);而 γ 则取有关层次的加权平均值,对于 $bcgf$ 块,应为

$$\gamma = \frac{\gamma_2 F_2 + \gamma_3 F_3 + \gamma_4 F_4}{F_2 + F_3 + F_4}$$

其中: F 为面积, γ 为容重。

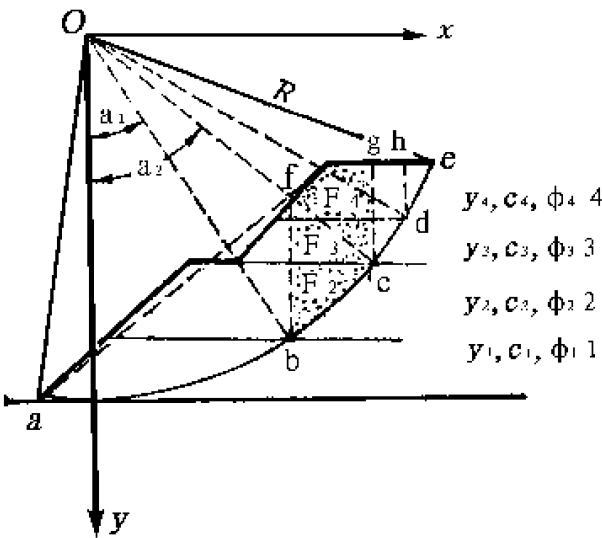


图 4-12 按不同土层划分为块

3. 对于边坡各部分斜度不同(而土质均一)的情况,可有二种解法:一是精确求法;二是近似求法。

精确求法可按边坡不同斜度部分划分为块(图 4-13 及图 4-15a 为 4 块),用公式(4-14)和(4-15)算出每块的 N 和 T ,而后累积相加得总值。每部分的 t 和 $\theta(=\frac{1}{m})$,则按该段边坡斜度线确定。

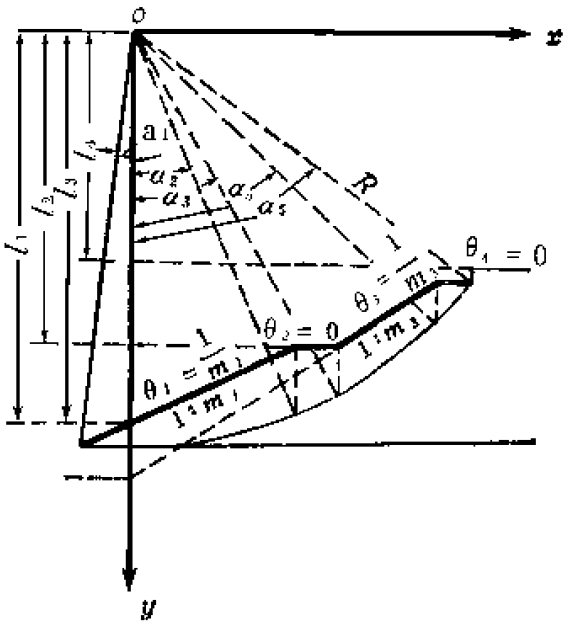


图 4-13 按边坡斜度划分为块

近似求法可绘出平均边坡线 1: m (图 4-15b)。并把滑坍土体划分为二块,用前述公式进行计算。 t 及 θ ($=\frac{1}{m}$) 按此平均边坡斜度线及顶面平波线来确定。

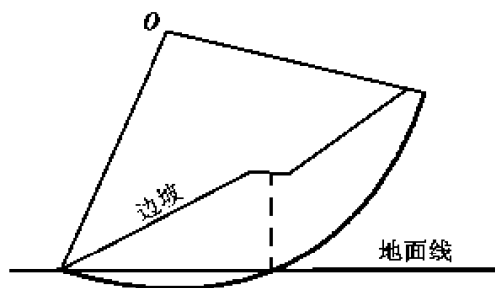


图 4-14 滑坍弧划入基底以下

4. 当滑弧划入基底以下(图 4-14),此法也亦适用。由于地基的 γ 、 c 、 ϕ 与路堤本身不一样,用此法时,应分别计算。

例题 4-2 已知所拟路堤横断面如图 4-15a, $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$, $c = 20 \text{ kPa}$, $\phi = 25^\circ$, $K = 1.25 \sim 1.50$, 堤顶荷载换算土柱高 $h_0 = 2.0 \text{ m}$, $R = 36.5 \text{ m}$ (取圆心在辅助线上并在坡脚竖线的上方), 试验算其稳定性。

解

(一)精确求法(图 4-15a)

边坡斜度以实际折线为准,堤顶荷载换算土柱高按 h_0 计入,其进行步骤如下:

1. 按边坡斜度的不同,把滑坍土体分成四段:1~2, 2~3, 3~4 和 4~5。
2. 求出 α 、 t 、及 θ :

纵轴 y 与各点的夹角 α 按式 $\sin \alpha = \frac{x}{R}$ 求得,其中 x 为 y 轴至各点 1、2、3、4、5 的横座标距离。

t 值按具体情况由作图或计算得出(最后一块应计入堤顶荷载换算土柱高 $h_0 = 2.0 \text{ m}$)。 $\theta = \frac{1}{m}$ 按具体情况求出。

3. 随即依式(4-14)及式(4-15)求出各滑动土块作用于圆弧弧段的 N 和 T ,并求出其总值。

$$\begin{aligned}\Sigma N &= N_{1 \sim 2} + N_{2 \sim 3} + N_{3 \sim 4} + N_{4 \sim 5} \\ \Sigma T &= T_{1 \sim 2} + T_{2 \sim 3} + T_{3 \sim 4} + T_{4 \sim 5}\end{aligned}$$

4. 求稳定系数 K (按式(4-16))。

计算可用表格进行(见表 4-3)。

对于弧段 1~2, 求 $N_{1 \sim 2}$ 及 $T_{1 \sim 2}$ 时, 用 α_1 、 α_2 、 $t_{1 \sim 2}$ 、 $\theta_{1 \sim 2}$;

对于弧段 2~3, 求 $N_{2 \sim 3}$ 及 $T_{2 \sim 3}$ 时, 用 a_2 、 a_3 、 $t_{2 \sim 3}$ 、 $\theta_{2 \sim 3}$;

余类推。

例如对于弧段 2~3 (按式(4-14)及式(4-15))为

$$N_{1 \sim 2} = \frac{rR^2}{6} \{ [(5 + \cos 2\alpha_2) \sin \alpha_2 - (5 + \cos 2\alpha_1) \sin \alpha_1] \}$$

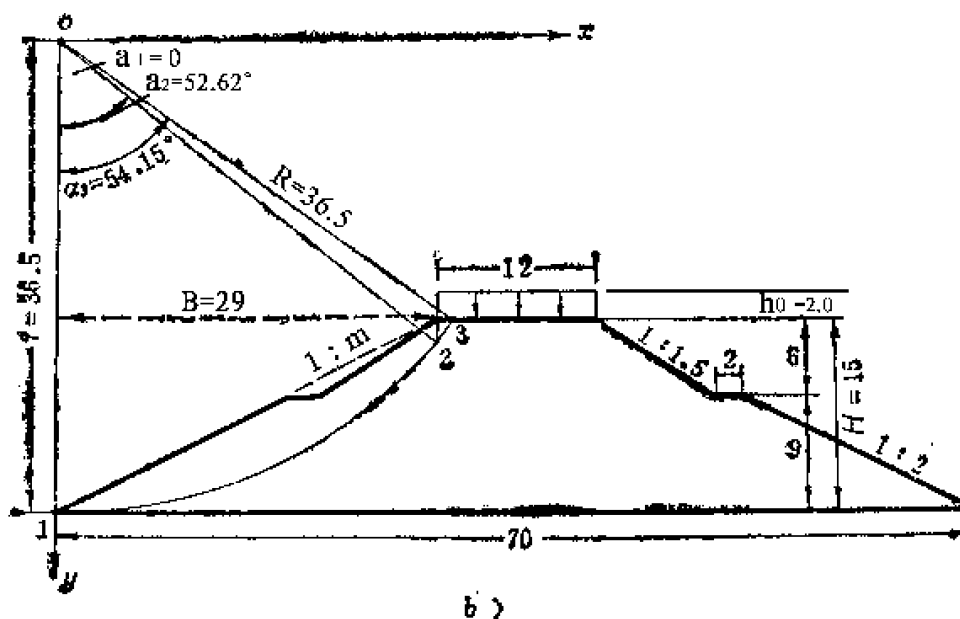
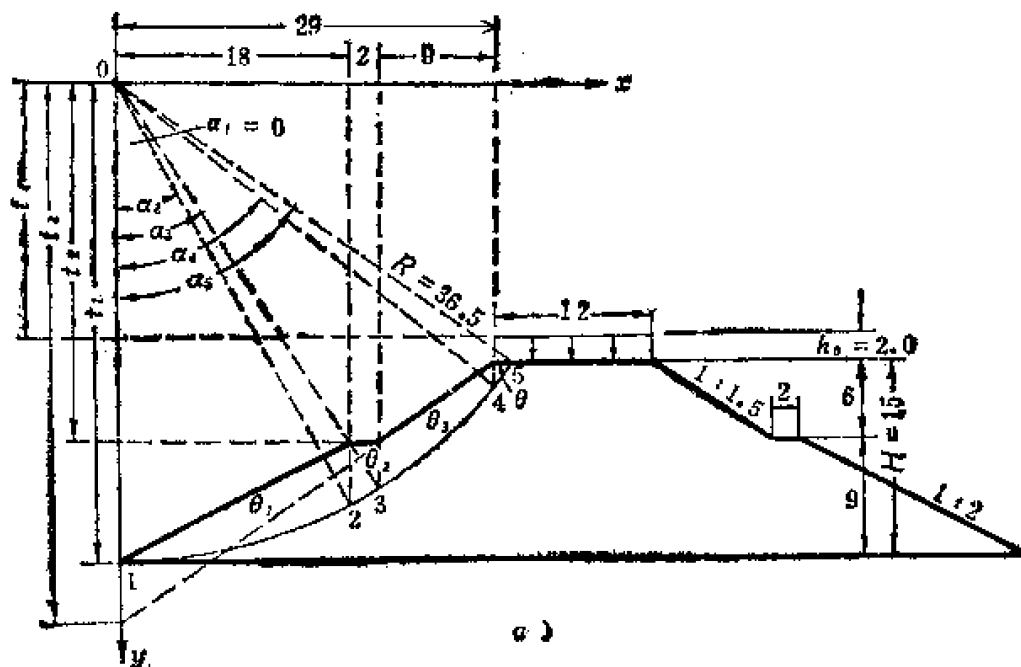


图 4-15 以公式计算法验算边坡稳定性例题(单位:m)
a)精确求法 b)近似求法

$$\begin{aligned}
 & -\frac{3t}{2R}((\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) + 2(\alpha_2 - \alpha_1)) \\
 & + \theta(\cos \alpha_1(1 + \cos 2\alpha_1) - \cos \alpha_2(1 + \cos 2\alpha_2)) \} \\
 & = 3886 \{ ((5 + 0.399) \times 0.548 - (5 + 0.514) \times 0.493) \\
 & - 1.13((0.917 - 0.858) + 2(0.580 - 0.515)) + 0 \} \\
 & = 104.9 \text{ kN} \\
 & T_{2 \sim 3} = \frac{\gamma R^2}{6} \left[(1 - \cos 2\alpha_1) \left(\frac{3t}{2R} - \cos \alpha_1 - \theta \sin \alpha_1 \right) \right. \\
 & \quad \left. + 2 \cos \alpha_1 - (1 - \cos 2\alpha_2) \left(\frac{3t}{2R} - \cos \alpha_2 - \theta \sin \alpha_2 \right) - 2 \cos \alpha_2 \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 3886[(1 - 0.514)(1.13 - 0.870 - 0) + 2 \times 0.870 \\
&\quad - (1 - 0.399)(1.13 - 0.836 - 0) - 2 \times 0.836] \\
&= 69.9 \text{ kN}
\end{aligned}$$

由表 4-3

表 4-3 边坡稳定性(精确求法)计算表

弧点	X (m)	R (m)	$\sin\alpha = \frac{x}{R}$	弧点半径线距 Y 轴的夹角 α		$\cos\alpha$	$\cos 2\alpha$	$\sin\alpha$	$\sin 2\alpha$	弧段	边坡线与 Y 轴交点的纵距 $t(\text{m})$	边坡斜度系数(纵:横) $\theta = \frac{1}{m}$	$\frac{3t}{2R}$	$\frac{\gamma R^2}{6}$ (kN)	N (kN)	T (kN)
				(°)	(rad)											
1	0	36.5	0	0	0	1	1	0	0	1~2	$t_{1\sim 2}=36.5$	$\theta_{1\sim 2}=\frac{1}{2}=0.5$	1.50	3886	874.4	287.6
2	18	36.5	0.493	$29.53 \div 57.3 = 0.515$		0.870	0.514	0.493	0.858	2~3	$t_{2\sim 3}=27.5$	$\theta_{2\sim 3}=0$	1.13	3886	104.9	69.9
3	20	36.5	0.548	33.23	0.580	0.836	0.399	0.548	0.917	3~4	$t_{3\sim 4}=40.8$	$\theta_{3\sim 4}=\frac{1}{1.5}=0.667$	1.677	3886	291.5	240.9
4	29	36.5	0.795	52.62	0.918	0.607	-0.263	0.795	0.965	4~5	$t_{4\sim 5}=17.5$	$\theta_{4\sim 5}=0$	0.801	3886	15.5	15.5
5	29.6	36.5	0.811	54.15	0.945	0.586	-0.314	0.811	0.949						$\Sigma N = 1286.3$	$\Sigma T = 613.9$

$$\begin{aligned}
\Sigma N &= 874.4 + 104.9 + 291.5 + 15.5 \\
&= 1286.3 \text{ kN} \\
\Sigma T &= 287.6 + 69.9 + 240.9 + 15.5 \\
&= 613.9 \text{ kN}
\end{aligned}$$

按式(4-16),当 $\text{tg}\phi = \text{tg}25^\circ = 0.466$, $c = 20 \text{ kPa}$, $L = 34.49 \text{ m}$ 时

$$K = \frac{1286.3 \times 0.466 + 20 \times 34.49}{613.9} = 2.10$$

沿辅助线取若干点为圆心,并绘出滑弧,依上法求 K ,得出其中最小的一个 K_{\min} 值,即可确定最危险滑弧的位置。

(二)近似求法(图 4-15b)

先绘坡脚与坡顶的连线,如图中虚线所示,此线斜度 1: m 即表示折线形边坡斜度的平均值。将滑坍土体划分为二块,如图 4-15b)所示,则边坡及坡顶斜度系数为边坡: θ_1

$$= \frac{1}{m} = \frac{H}{B} = \frac{15}{29} = \frac{1}{1.933} = 0.517$$

坡顶: $\theta_2 = 0$

土的容重 $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$, 则

$$\frac{\gamma R^2}{6} = \frac{17.5 \times (36.5)^2}{6} = 3886 \text{ kN}$$

弧点 1、2、3 的半径线与通过圆心的竖线之间的夹角为

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 52.62^\circ, \alpha_3 = 54.15^\circ$$

计算结果,如表 4-4 所示。

N 及 T 则按式(4-14)及式(4-15)来计算,并列入表中

$$\Sigma N = 1442.1 \text{ kN}$$

$$\Sigma T = 704.1 \text{ kN}$$

稳定系数按式(4-16)为

$$\begin{aligned} K &= \frac{(\Sigma N) \operatorname{tg} \phi + c \hat{L}}{\Sigma T} \\ &= \frac{1442.1 \times 0.466 + 20 \times 34.49}{704.1} \\ &= 1.93 \end{aligned}$$

近似求法的 ΣN 和 ΣT 均比前述精确求法的结果为大,其原因在于被脚、坡顶的联线比原有折线为高,致使土重有所增大的结果。

表 4-4 以公式计算法验算边坡稳定性(近似求法)

弧点	X (m)	R (m)	$\sin \alpha = \frac{x}{R}$	弧点半径线距 Y 轴的夹角 α		$\cos \alpha$	$\cos 2\alpha$	$\sin \alpha$	$\sin 2\alpha$	弧段	边坡线与 Y 轴 交点的纵距 t (m)	边坡斜度系 数(纵·横) $\theta = \frac{1}{m}$	$\frac{3t}{2R}$	$\frac{\gamma R^2}{6}$ (kN)	N (kN)	T (kN)
				(°)	(rad)											
1	0	36.5	0	0	0	1	1	0	0	1~2	36.5	0.517	1.50	3886	1426.6	688.6
2	29	36.5	0.795	52.62	0.918	0.607	-0.263	0.795	0.965	2~3	19.5	0	0.801	3886	15.5	15.5
3	29.6	36.5	0.811	54.15	0.945	0.586	-0.314	0.811	0.949						$\Sigma N = 1442.1$	$\Sigma T = 704.1$

第五节 圆弧法验算之三(表解法)

一、计算方法

在图解和计算的基础上经过分析研究,可制定一些表,并按下式来计算稳定系数。

由图 4-16,将土体划分各小块,其宽为 b ,高为 a ,滑弧全长为 L ,此三者比照边坡高度 H 来表示,即

$$\begin{aligned} b &= \beta H \\ a &= \xi H \\ L &= \lambda H \end{aligned}$$

坡长每 1m 的土块总量为

$$Q = a \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma = \xi B \gamma H^2$$

其法向和切向分力为

$$N = Q \cdot \cos \alpha = \xi \beta \gamma H^2 \cdot \cos \alpha$$

$$T = Q \cdot \sin \alpha = \xi \beta \gamma H^2 \cdot \sin \alpha$$

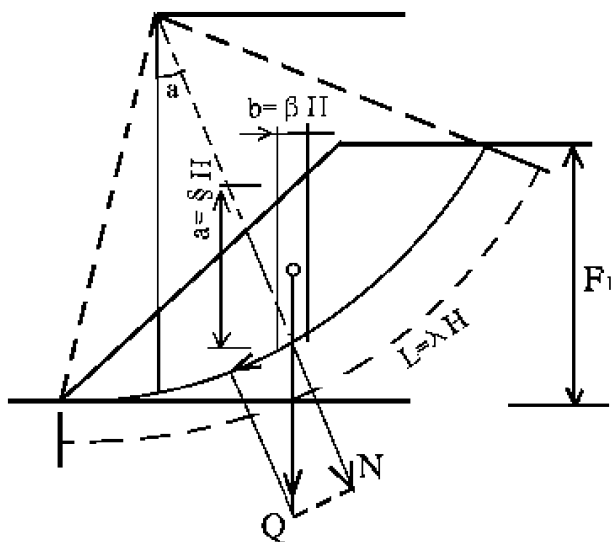


图 4-16 以表解法验算边坡稳定性的原理

稳定系数为

$$K = \frac{\sum fN + cL}{\sum T} = \frac{f \sum \xi \beta \gamma H^2 \cos \alpha + c \gamma H}{\sum \xi \beta \gamma \cdot H^2 \sin \alpha}$$

令

$$A = \frac{\sum \xi \cos \alpha}{\sum \xi \sin \alpha} \quad B = \frac{\lambda}{\sum \xi \beta \sin \alpha}$$

由此可得

$$K = fA + \frac{c}{\gamma H} \cdot B \quad (4-17)$$

式中: H ——边坡高度, m;

A 和 B ——取决于几何尺寸的系数, 由表 4-5 或 4-6;

c ——土的单位粘聚力, kPa;

f ——土的内摩擦系数, $f = \tan \phi$, 其中 ϕ 为土的内摩擦角,

二、注意事项

1. 当最危险圆弧通过坡脚时(图 4-17), A 、 B 值由表 4-5 查得。
2. 当最危险圆弧在坡脚以外时(图 4-18), A 、 B 值取自表 4-6; 当地基为软弱土层, 滑弧的圆心坐标, 见表 4-7。
3. 适用范围: 此法适用于一坡到顶, 且坡顶为永平并延伸至无限远者。
4. 如边坡由多层土体所组成, 则式(4-17)的 c 、 f 、 γ 可近似地采用式(4-2)计算。

滑动圆弧通过坡脚的A、B值

表4-5

边坡斜度	滑动圆弧的圆心									
	O ₁		O ₂		O ₃		O ₄		O ₅	
i ₀	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1:1	2.34	5.79	1.87	6.00	1.57	6.57	1.40	7.50	1.24	8.80
1:1 $\frac{1}{4}$	2.64	6.05	2.16	6.35	1.82	7.03	1.66	8.02	1.48	9.65
1:1 $\frac{1}{2}$	3.04	6.25	2.54	6.50	2.15	7.15	1.90	8.33	1.71	10.10
1:1 $\frac{3}{4}$	3.44	6.35	2.87	6.58	2.50	7.22	2.18	8.50	1.96	10.41
1:2	3.84	6.50	3.23	6.70	2.80	7.26	2.45	8.45	2.21	10.10
1:2 $\frac{1}{4}$	4.25	6.64	3.58	6.80	3.19	7.27	2.84	8.30	2.53	9.80
1:2 $\frac{1}{2}$	4.67	6.65	3.98	6.78	3.53	7.30	3.21	8.15	2.85	9.50
1:2 $\frac{3}{4}$	4.99	6.04	4.33	6.78	3.86	7.24	3.59	8.02	3.20	9.21
1:3	5.32	6.60	4.69	6.75	4.24	7.23	3.97	7.87	3.59	8.81

滑动圆弧在坡脚以外的A、B值

表4-6

边坡斜度	滑动圆弧的圆心									
	O ₁		O ₂		O ₃		O ₄		O ₅	
i ₀	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
$e = \frac{h}{4}$										
1:1	2.87	5.93	2.56	6.10	2.29	6.70	2.11	7.80	2.02	9.70
1:1 $\frac{1}{4}$	2.98	6.12	2.66	6.32	2.43	6.80	2.27	7.75	2.15	9.35
1:1 $\frac{1}{2}$	3.10	6.35	2.80	6.53	2.58	6.91	2.42	7.70	2.30	9.02
1:1 $\frac{3}{4}$	3.22	6.54	2.93	6.72	2.74	7.02	2.59	7.65	2.46	8.70
1:2	3.37	6.76	3.10	6.87	2.91	7.15	2.76	7.60	2.63	8.40
1:2 $\frac{1}{4}$	3.53	7.12	3.26	7.23	3.10	7.50	2.95	7.96	2.82	8.75
1:2 $\frac{1}{2}$	3.73	7.51	3.46	7.62	3.30	7.86	3.14	8.31	3.02	9.13
1:2 $\frac{3}{4}$	3.94	7.90	3.68	8.00	3.50	8.20	3.35	8.70	3.25	9.53
1:3	4.20	8.31	3.93	8.40	3.71	8.60	3.57	9.10	3.51	9.90

边坡斜度	滑 动 圆 弧 的 圆 心									
	O_1		O_2		O_3		O_4		O_5	
i	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B

$$e = \frac{h}{2}$$

1:1	3.40	5.91	3.17	5.92	2.97	6.00	2.82	6.25	2.74	6.93
1:1 $\frac{1}{4}$	3.47	5.98	3.24	6.02	3.04	6.14	2.91	6.46	2.82	7.18
1:1 $\frac{1}{2}$	3.55	6.08	3.32	6.13	3.13	6.28	3.05	6.68	2.91	7.43
1:1 $\frac{3}{4}$	3.64	6.18	3.41	6.26	3.22	6.41	3.11	6.89	3.01	7.68
1:2	3.76	6.30	3.53	6.40	3.33	6.62	3.23	7.10	3.12	7.93
1:2 $\frac{1}{4}$	3.90	6.44	3.66	6.56	3.49	6.81	3.38	7.32	3.27	8.05
1:2 $\frac{1}{2}$	4.08	6.61	3.82	6.74	3.66	7.01	3.56	7.55	3.47	8.17
1:2 $\frac{3}{4}$	4.25	6.81	4.02	6.95	3.86	7.25	3.76	7.77	3.63	8.28
1:3	4.40	7.06	4.24	7.20	4.07	7.50	3.97	8.00	3.91	8.40

$$e = h$$

1:1	4.47	5.77	4.32	5.80	4.19	5.86	4.15	6.19	4.13	6.60
1:1 $\frac{1}{4}$	4.58	5.84	4.43	5.86	4.27	5.90	4.22	6.20	4.19	6.60
1:1 $\frac{1}{2}$	4.70	5.91	4.54	5.93	4.37	5.97	4.30	6.22	4.26	6.60
1:1 $\frac{3}{4}$	4.82	5.98	4.66	6.00	4.46	6.05	4.38	6.25	4.34	6.61
1:2	4.95	6.05	4.76	6.08	4.58	6.13	4.48	6.31	4.43	6.61
1:2 $\frac{1}{4}$	5.08	6.12	4.90	6.16	4.69	6.22	4.58	6.38	4.53	6.61
1:2 $\frac{1}{2}$	5.21	6.19	5.03	6.26	4.81	6.33	4.70	6.46	4.65	6.71
1:2 $\frac{3}{4}$	5.35	6.26	5.17	6.38	4.95	6.45	4.84	6.57	4.78	6.81
1:3	5.50	6.33	5.31	6.47	5.10	6.60	5.00	6.70	4.95	6.91

$$e = 1 \frac{1}{2} h$$

边坡斜度	滑动圆弧的圆心									
	O_1		O_2		O_3		O_4		O_5	
i	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1:1	5.92	6.73	5.78	6.75	5.67	5.77	5.57	6.79	5.44	5.83
1:1 $\frac{1}{4}$	5.99	5.78	5.86	5.80	5.73	5.84	5.65	5.87	5.53	5.97
1:1 $\frac{1}{2}$	6.07	5.82	5.94	5.85	5.83	5.92	5.72	5.96	5.63	6.12
1:1 $\frac{3}{4}$	6.14	5.87	6.02	5.90	5.89	5.99	5.81	6.04	5.72	6.27
1:2	6.22	5.92	6.10	6.95	5.97	6.07	5.89	6.12	5.81	6.42
1:2 $\frac{1}{4}$	6.30	5.95	6.18	5.98	6.05	6.08	5.97	6.15	5.90	6.43
1:2 $\frac{1}{2}$	6.38	5.98	6.26	6.02	6.14	6.10	6.06	6.19	5.99	6.44
1:2 $\frac{3}{4}$	6.46	6.01	6.34	6.05	6.23	6.11	6.15	6.22	6.08	6.45
1:3	6.55	6.04	6.44	6.09	6.32	6.12	6.24	6.25	6.17	6.46

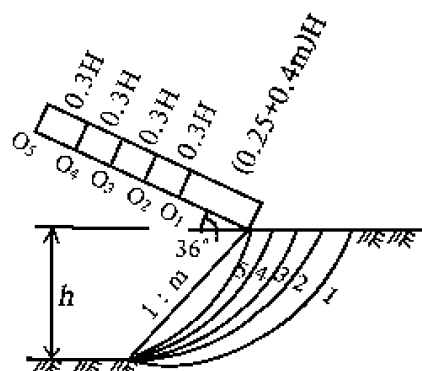


图 4-17 滑动圆弧通过坡脚图

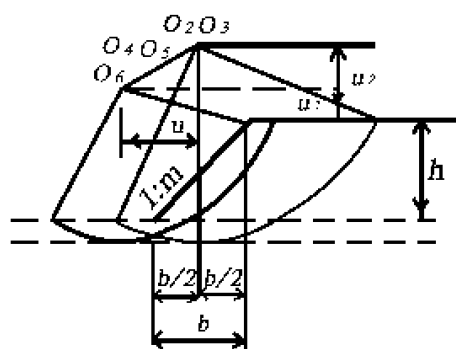


图 4-18 滑动圆弧通过坡脚以外

表 4-7 软弱地基时的圆心坐标

c	滑动圆心坐标	边 坡		
		1: 1 $b = h$	1: 2 $b = 2h$	1: 3 $b = 3h$
$\frac{1}{4}h$	u	$0.75h$	$0.50h$	$0.60h$
	u_1	$0.50h$	$0.35h$	$1.15h$
	u_2	$0.75h$	$0.95h$	$1.75h$
$\frac{1}{2}h$	u	$0.50h$	$0.60h$	$6.60h$
	u_1	$0.12h$	$0.30h$	$0.90h$
	n_2	$0.63h$	$1.10h$	$1.70h$
h	u	$0.50h$	$0.40h$	$0.40h$
	u_1	$0.12h$	$0.20h$	$0.60h$
	u_2	$1.38h$	$1.00h$	$1.50h$
$1\frac{1}{2}h$	u	$0.25h$	$0.50h$	$0.40h$
	u_1	$0.25h$	$0.50h$	$0.50h$
	u_2	$1.00h$	$1.25h$	$1.70h$

第六节 河滩路堤稳定性验算

一、渗透动水压力的作用

河滩路堤的下部每年常遭一次或几次、长期或短期的大水淹没，路堤除承受普通路堤所承受的外力及自重外，还要承受水的浮力及渗透动水压力的作用。当河中水位上升时，水从边坡的一侧或两侧渗入路堤内；而当水位降落时，水又从堤身向外渗出。由于在土体内渗水速度与水位升降速度较堤外慢些，故在堤外水位成凸形（图 4-19 中 B 线）。渗透速度随土的性质而异。

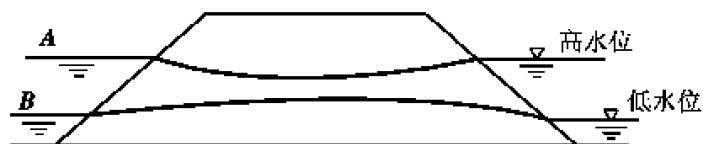


图 4-19 路堤内浸润曲线位置