

条形基础极限承载力数值分析

韩冬冬¹, 贾敏才², 刘开富¹, 谢新宇¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 根据塑性力学滑移线理论, 推导了条形地基在极限平衡状态下的平衡微分方程, 然后利用有限差分法推出地基土在极限状态时的有限差分公式, 结合边界条件编制出地基承载力计算程序, 该程序求解条形地基极限状态下的滑移线区域及相应的地基极限承载力值时可以考虑基础埋深、地基土重度、土的内摩擦角、基础与地基摩擦等参数。利用程序, 得到了土的内摩擦角与地基承载力系数 N_γ 的对应表, 并全面讨论了基础埋深、地基土重度、内摩擦角及基础与地基摩擦角等参数对地基承载力和滑移线形状的影响, 得到了一些有意义的结论。

关键词: 滑移线; 极限平衡; 有限差分法; 承载力

中图分类号: TU 471.1⁺2

文献标识码: A

Numerical analysis of bearing capacity of a foundation under strip footing

HAN Dong-dong¹, JIA Min-cai², LIU Kai-fu¹, XIE Xin-yu¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the slip-line in plastic mechanics, equilibrium differential equations of a foundation in limit equilibrium state under a strip footing are deduced. using the finite-difference method, the finite difference formula in limit equilibrium state is given. Combining with the boundary conditions, a program for computing the bearing capacity is written that can compute the slip-line field and the corresponding bearing capacity considering the depth of embedment, the unit weight, the internal frictional angle and the roughness of the foundation at the same time. The calculating results of the bearing capacity factor N_γ are shown with the change of the internal frictional angle. The influences of the depth of embedment, the unit weight, the internal frictional angle and the roughness of the foundation on the shape of slip lines and the bearing capacity, are generally discussed; and some valuable conclusions are drawn.

Key words: slip line; limit equilibrium method; finite difference method; bearing capacity

1 引言

地基承载力和土压力、边坡稳定并称为土力学的3个经典问题。在地基承载力计算理论方面, 目前主要有3种分析方法: 极限平衡法、滑移线法和极限分析法。3种方法中, 有重土滑移线方法的精确解^[1], 目前的研究仍不能严格证明其是否为完全解, 因此, 在工程中应用时受到一定的限制; 极限分析方法^[2]理论严密, 但由于是在变分原理的基础上进行的, 难以扩展到复杂边界和分层土体的应用中去; 极限平衡法^[3]相对简单, 且许多解都已经以图形或表格的形式汇总出来, 易于为工程设计人员接受和掌握, 在工程实际中发挥出了很大的作用,

但其解答只是一种近似解。从极限状态土中一点的平衡微分方程来看, 要求得同时考虑基础埋深、地基土重度、内摩擦角、基础与基底土摩擦的土的极限承载力的解析解是困难的^[4], 因此, 本文采用数值计算方法进行分析。

地基承载力系数 N_q , N_c 和 N_γ 3项中, N_q 和 N_c 的取值目前各学者认识较统一, 但对 N_γ 的取值, 目前还没有统一的认识; 此外, 基础与土的各种参数对地基破坏时滑移面的影响也少有学者做出研究。基于上述原因, 本文考虑对极限平衡状态时土的微分方程采用有限差分方法得到其有限差分公式, 然后根据差分公式并结合边界条件编程, 通过程序计算同时考虑基础埋深、地基土重度、土的内摩擦角、

基础与基底土摩擦的土的极限承载力, 并得到土的内摩擦角与相应的地基承载力系数 N_γ 取值的对应表, 最后讨论各种因素对地基破坏时滑移面的影响。

2 计算理论与方法

2.1 土体极限平衡状态时任一点的滑移线方程

若选取 OX 坐标轴水平, OY 坐标轴竖直, 如图 1 所示, 则根据塑性力学滑移线理论, 极限平衡状态时土体内部任意一点的两族滑移线方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \tan(\eta \mp \theta_1) \\ d\sigma \mp 2\sigma \tan \varphi d\eta &= \gamma[dy \mp dx \tan \varphi] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ 为特征应力, $\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + cc \tan \varphi$, 其中 σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力; c 为土的内摩擦角; η 为大主应力 σ_1 的作用线与水平线之间的夹角; $\theta_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$, 为两条滑移线与大主应力 σ_1 的作用方向线之间的夹角; φ 为土的内摩擦角; γ 为单位土体重度。

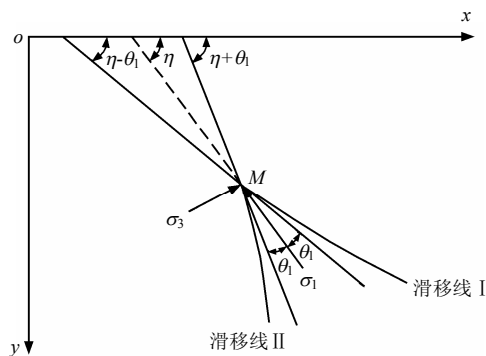


图 1 土中任意点主应力与滑移线关系示意图

Fig.1 The relationship of principal stresses and slip lines in soil

2.2 滑移线的有限差分表达式

若有图 2 所示的两组滑移线, 第 I 族滑移线中的第 i 条滑移线和第 II 族滑移线中的第 j 条滑移线相交于结点 (i, j) , 在第 i 条滑移线上, 结点 1 是第 i 条滑移线上结点 (i, j) 周围的一个点, 结点 2 是第 j 条滑移线上结点 (i, j) 周围的一个点。若结点 (i, j) , 1, 2 等处的 x, y 坐标和 η 角分别为: $x, y, \eta; x_1, y_1, \eta_1; x_2, y_2, \eta_2$, 则以结点 (i, j) 为中心进行差分, 对于第 I 族滑移线上的结点 (i, j) 和结点 1, $dx, dy, d\eta$ 可近似地分别表示为 $dx = x - x_1, dy = y - y_1, d\eta = \eta - \eta_1$ 。对于第 II 族滑移线上的结点 (i, j) 和结点 2, $dx, dy, d\eta$ 可近

似地分别表示为 $dx = x - x_2, dy = y - y_2, d\eta = \eta - \eta_2$ 。

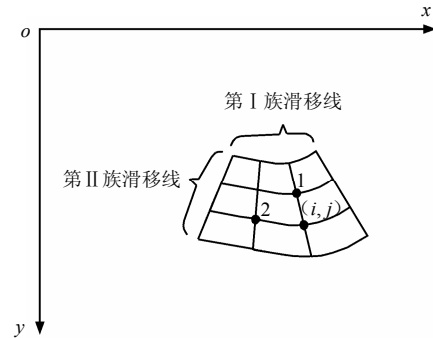


图 2 滑移线网示意图

Fig.2 Sketch map of slip lines

分别将第 I 族和第 II 族值代入公式 (1), 整理并略去高阶无穷小, 得到两族滑移线的差分方程分别为

$$\left. \begin{aligned} y - y_1 &= (x - x_1) \tan(\eta - \theta_1) \\ \sigma - \sigma_1 - 2\sigma_1(\eta - \eta_1) \tan \varphi &= \gamma[(y - y_1) - (x - x_1) \tan \varphi] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} y - y_2 &= (x - x_2) \tan(\eta - \theta_2) \\ \sigma - \sigma_2 - 2\sigma_2(\eta - \eta_2) \tan \varphi &= \gamma[(y - y_2) - (x - x_2) \tan \varphi] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

联立式 (2) 和式 (3), 可得到滑移线任意结点 (i, j) 处 x, y, η 和 σ 值的表达式为

$$x = \frac{x_1 \tan(\eta_1 - \theta_1) - x_2 \tan(\eta_2 + \theta_1) - (y_1 - y_2)}{\tan(\eta_1 - \theta_1) - \tan(\eta_2 + \theta_1)} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} y &= y_1 + (x - x_1) \tan(\eta_1 - \theta_1) \\ \text{或 } y &= y_2 + (x - x_2) \tan(\eta_2 + \theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{1}{2(\sigma_1 + \sigma_2) \tan \varphi} \{ 2(\sigma_1 \eta_1 + \sigma_2 \eta_2) \tan \varphi - \sigma_1 + \sigma_2 + \gamma[y_1 - y_2 + (2x - x_1 - x_2) \tan \varphi] \} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 + 2\sigma_1(\eta - \eta_1) \tan \varphi + \gamma[(y - y_1) - (x - x_1) \tan \varphi] \\ \text{或 } \sigma &= \sigma_2 - 2\sigma_2(\eta - \eta_2) \tan \varphi + \gamma[(y - y_2) - (x - x_2) \tan \varphi] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当滑移线上任意结点 (i, j) 周围的两个结点 (结点 1 和结点 2) 的 x, y, η 和 σ 值为已知时, 即可根据公式 (4) ~ (7) 计算结点 (i, j) 处的 x 值、 y 值、 η 值和 σ 值。然后根据 x 值、 y 值、 η 值

和 σ 值得到大主应力 σ_1 和其它想要的参数。

3 求解思路

如图 3, OD 为基础宽度, q 为上覆土体荷载, 计算时, 应首先在边界 OA 上根据计算精度要求设置若干个等间距的计算点, 通作这些计算点引出的两组滑移线相交成为滑移线网, 两组滑移线的交点即为计算点。

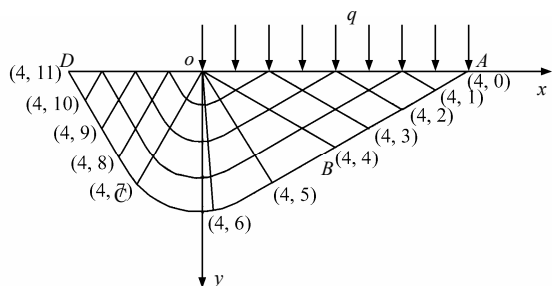


图 3 地基极限承载力求解过程示意图

Fig.3 The resolution process of the ultimate bearing capacity of a foundation

在被动极限平衡状态下, 包括 O 点在内的、从基底 OD 到 OA 的滑移线, 如 $ABCD$ 线, 都属于第 I 族滑移线, 与第 I 族相交的滑移线, 如 OB , OC 线, 均属于第 II 族滑移线。为确定计算点的位置, 应对每个计算点用 (i, j) 进行编号, i 表示第 I 族滑移线中的第 i 条滑移线, j 表示第 II 族滑移线中的第 j 条滑移线, 故编号为 (i, j) 的点表示上述两条滑移线的交点。对于第 I 族滑移线, 应从 O 点向下依次编号为 $i=0, 1, 2, 3, 4$ (图中包括 O 点在内共计 5 条); 对于第 II 族滑移线, 应从 A 点向 O 点并到 D 点进行编号, 依次编号为 $j=0, 1, 2, 3, \dots, 11$ (图中包括 A 点和 D 点在内共计 12 条)。图 3 中的 $ABCD$ 线表示第 I 族 $i=4$ 的滑移线, 该线上所有点的编号, 从 $(4, 0)$ 到 $(4, 11)$, 都在图上标出。

计算时首先在 OA 边界赋值, AOB 区域内按照第 1 类边界问题 (柯西问题) 进行计算, OCB 区域按照第 2 类边界问题 (古萨尔问题) 进行计算, 最后的 OCD 区域按照第 3 类边界问题 (混合边界问题) 进行计算。详细内容可参考文献[5]。

4 程序算例

假定一基础宽度 3 m, 埋深 1.5 m, 地基土的重度 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 内聚力 $c = 0$, 不考虑地下水的影响, 则基底深度处 $q = 27 \text{ kPa}$ 。

文中计算结果分析都将在上述算例的基础上进行。

4.1 程序验证

普朗特课题对无黏性土的地基承载力理论公式为

$$P_u = q \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) e^{\pi \tan \varphi} = q N_q \quad (8)$$

当 $q=1$ 时, 计算得到的地基承载力值就是地基承载力系数, 本文和普朗特得到的不同 φ 值与 N_q 的对应表见表 1, 根据结果可知, 两者计算结果基本相同。证明了本程序计算结果的可靠性。

表 1 本文和普朗特 N_q 计算结果对比
Table 1 N_q of the present method and of Prandtl's theory

$\varphi / (^\circ)$	5	10	15	20	25	30
本文 N_q	1.57	2.47	3.93	6.36	10.55	18.10
普朗特 N_q	1.57	2.47	3.94	6.40	10.66	18.40

4.2 本文和索科洛夫斯基承载力计算结果对比

当 $B = 3 \text{ m}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 30^\circ$, $q = 27 \text{ kPa}$ 时, 取 φ 分别为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 和 40° , 对基础中心地基极限承载力进行计算, 两种方法的计算结果见表 2。

表 2 本文和索科洛夫斯基承载力计算结果对比
Table 2 The bearing capacity calculated by the present method and by Sokolovsky's theory

$\varphi / (^\circ)$	本文解 P_{u1} / kPa	索科洛夫斯基解 P_{u2} / kPa	相对误差值 $ P_{u1} - P_{u2} / P_{u2} / \%$
5	71.8	59.22	21.24
10	103.2	87.03	18.58
15	156.4	134.28	16.47
20	249.2	216.54	15.08
25	417.3	366.48	13.87
30	737.5	650	13.46
35	1389	1231.1	12.83
40	2836	2526.8	12.24

计算结果表明, 本文计算结果比索科洛夫斯基的计算结果^[6]大, 原因在于, 本文得到的地基承载力系数 N_γ 要比索科洛夫斯基给出的大。对于内摩擦角小且基础宽度大的地基, $\gamma x N_\gamma$ 项在地基承载力中所占比例较大, 这是两者计算结果差别的主要原因。

4.3 地基承载力系数 N_γ

(1) 本文与现有地基承载力系数 N_γ 的对比

根据程序输出的结果, 地基极限承载力沿基础宽度为直线分布, 则 N_γ 可以由基础两端点处应力差

值除以其相对距离求出。当 $q = 27 \text{ kPa}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\delta = 0^\circ$ 时, 本文计算得到的不同 φ 值对应的 N_γ 值的计算结果和索科洛夫斯基给出的值^[6]见表 3。由表 3 可以看出, 本文的计算结果要比索科洛夫斯基给出的结果大。

表3 本文与索科洛夫斯基地基承载力系数 N_γ 值比较
Table 3 N_γ of the present method and of Sokolovsky's theory

$\varphi / (^\circ)$	5	10	15	20	25	30	35	40
本文	0.35	1.10	2.61	5.68	12.08	26.03	58.54	141.57
索科洛夫斯基	0.17	0.56	1.40	3.16	6.92	15.32	35.19	86.46

表 4 列出了 N_γ 值的其它经典计算结果, 由表 4 可以看出, 虽然本文方法算出的 N_γ 值较索科洛夫斯基的大, 但与 W. F. Chen 有限元法结果的上限解^[2]及魏锡克 (Vesic) 给出的值接近。在 $\varphi = 30^\circ$ 时, 本文计算得到的 N_γ 值为 26.03, 陈祖煜斜条分法的下限解^[7]为 24.21, 两者结果也比较接近。

表4 本文计算得到的地基承载力系数 N_γ 值与经典结果比较
Table 4 N_γ of the present method and of classical theories

$\varphi / (^\circ)$	本文	W. F. Chen	Terzaghi	Meyerhof	Vesic
2	0.11	0.16	0.01	0.01	0.15
4	0.26	0.35	0.05	0.03	0.34
6	0.46	0.60	0.14	0.08	0.57
8	0.73	0.91	0.27	0.15	0.86
10	1.10	1.31	0.47	0.26	1.22
12	1.58	1.84	0.76	0.42	1.69
14	2.22	2.52	1.16	0.64	2.29
16	3.06	3.42	1.72	0.96	3.06
18	4.19	4.61	2.49	1.38	4.07
20	5.68	6.20	3.54	1.97	5.39
22	7.69	8.32	4.96	2.76	7.13
24	10.39	11.17	6.89	3.83	9.44
26	14.06	15.05	9.53	5.29	12.54
28	19.08	20.35	13.13	7.29	16.72
30	26.03	27.66	18.08	10.05	22.40

(2) 基础摩擦对地基承载力系数 N_γ 的影响分析

在 $q = 27 \text{ kPa}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 30^\circ$ 条件下, 分别取基础与地基土的摩擦角 δ 等于 0° , 2° , 4° , $6^\circ \dots \dots 30^\circ$, 对 N_γ 值进行计算, 计算得到的基础与地基土摩擦角 δ 与地基承载力系数 N_γ 关系见图 4。由图可见, 随着基础与基底土摩擦角的增大, 地基承载力系数 N_γ 也逐渐增大, δ 与 N_γ 近似成直线关系, 可见其它条件相同时, N_γ 值基本随 δ 增加而线

性增加。

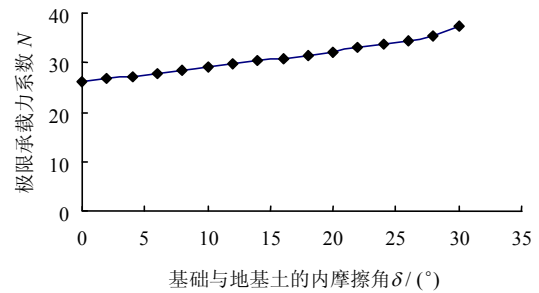


图4 基础粗糙程度与地基承载力系数 N_γ 关系图
Fig.4 The relationship between the roughness of the foundation base and the bearing capacity coefficient N_γ

5 极限状态时地基滑移线形状的影响因素分析

5.1 地基土重度对土的滑移线形状的影响

取 $q = 1 \text{ kPa}$, $c = 0$, $\varphi = 30^\circ$, γ 的值分别为 0, 6, 12, 18 kN/m^3 进行计算, 计算得到土的滑移线形状如图 5 示。

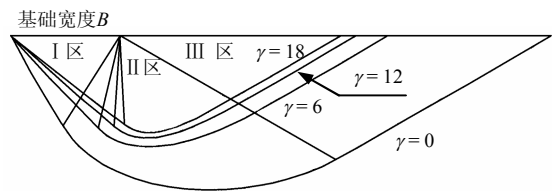


图5 不同重度取值时土的滑移线形状图
Fig.5 Shapes of slip lines with variation of the unit weight of the foundation

由图 5 可以看出, 无重土极限状态时的滑移线区域要比有重土的大且深。尽管一般说来, 土的剪切破坏区域 (即滑移线区域) 越大, 土的极限承载力就越大, 这并不意味着无重土的极限承载力会比同种条件下有重土的极限承载力大。因为同种条件下, 土的重度比滑移线区域对极限承载力贡献更大。

由图 5 还可看出, 随着土重度的不断增大, 滑移线区域越来越小, 土的过渡区 (II 区) 顶角也越来越小, 与太沙基 (Terzaghi) 和梅耶霍夫 (Meyerhof) 的实测结果^[8,9]一致。太沙基、梅耶霍夫在对地基土破坏时滑移线进行实测时发现, 土体破坏时过渡区的土体滑移线形状与理论计算的无重土滑移线相似, 为对数螺旋线, 但有重土体的滑移线区域比无重土的滑移线区域小, 且 I 区两条滑移线为曲线, 过渡区顶角小于 90° , 有重土 III 区和无重土的为相似三角形。除 I 区两条滑移线为曲线外, 其它实测结果都与本文严格一致。

图 5 的分析结果也表明, 基础无埋深时, 土的重度对过渡区顶角和滑移线形状的影响很大。对无埋深基础, 太沙基和梅耶霍夫用极限平衡理论推导地基承载力^[8,9]时, 采用忽略土的重度对滑移线形状的影响这一假设是有较大误差的。由于有重土比无重土滑移线区域小很多, 这一假定必然导致地基极限承载力值偏大。

5.2 地基土内摩擦角对土的滑移线形状的影响

为了更好地体现土的内摩擦角对土的滑移线形状的影响, 首先考虑取地表处无重土的情况进行计算分析, 然后再对考虑地基土重度的有埋深基础进行计算分析。

以 $q=1$, $\gamma=0$, $\delta=0^\circ$ 为条件, 分别取 $\varphi=5^\circ$, 10° , 15° , 20° , 25° , 30° 进行计算, 计算得到的土的滑移线形状如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 随着土的内摩擦角增大, 土的滑移线区域也越来越大、越深。这必然引起地基承载力值越来越高。

图 6 结果也表明, 只有内摩擦角决定土的地基承载力时, 随着土的内摩擦角的增大, 土体破坏时滑移线形状不变, 主动区 I 区滑移线与基础倾角减小, 被动区 III 区滑移线与地表锐角减小, 但过渡区 II 区顶角不变, 且滑移线为对数螺旋线, 本文的分析结果与普朗特解析解答一致。

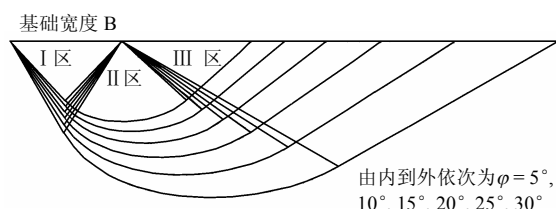


图6 无埋深基础、不同内摩擦角取值时土的滑移线形状图
Fig.6 Shapes of slip lines with variation of the internal frictional angle (without embedment)

再以 $q=27 \text{ kPa}$, $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, $\delta=0^\circ$ 为条件, 同样分别取 $\varphi=0^\circ$, 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° 进行计算, 计算得到的土的滑移线形状如图 7 所示。

由图 7 可得到以下结论:

(1) 考虑基础埋深及土体自重时, 相同内摩擦角时土的滑移线区域虽然有所减小, 但与不考虑基础埋深及土体自重相比, 两者相差不大, 说明土的内摩擦角依然对土的滑移线区域影响很大。

(2) 土的内摩擦角对地基土的极限承载力的贡献是非常大的, 因为 φ 的大小直接影响到地基承载力系数 N_q , N_c 和 N_γ 的取值。

(3) 对于无埋深且不考虑土重度的地基, 土的内摩擦角对过渡区顶角没有影响, 而对有埋深和有重土而言并非如此。在埋深和土的重度一定时, 土的内摩擦角增大, 将导致土体 II 区的过渡区顶角逐渐增大, 这一定程度上抵消了土体重度对过渡区顶角的影响。

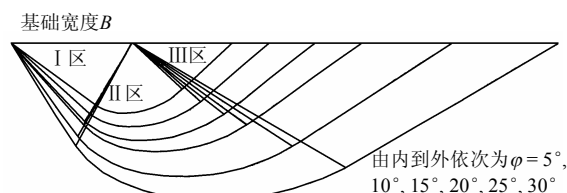


图7 不同内摩擦角取值时土的滑移线形状图
($q=27 \text{ kPa}$, $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$)

Fig.7 Shapes of slip lines with variation of the internal frictional angle

5.3 基础埋深对土的滑移线形状的影响

基础埋深的增加对无重土的滑移线形状没有影响, 这个结论可以从普朗特解答中获得。因此, 本节主要讨论基础埋深对有重土的影响。

取 $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=30^\circ$, $\delta=0^\circ$, 分别按地面 ($q=0$), 埋深 0.5 m ($q=9 \text{ kPa}$), 埋深 1 m ($q=18 \text{ kPa}$), 埋深 1.5 m ($q=27 \text{ kPa}$), 埋深 2 m ($q=36 \text{ kPa}$) 计算得到的土的滑移线形状如图 8 所示。

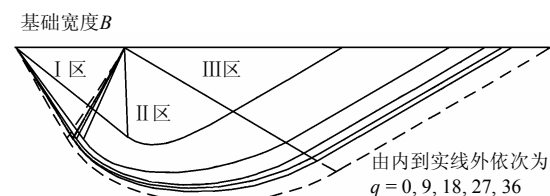


图8 不同埋深时土的滑移线形状图($\varphi=30^\circ$, $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$)
Fig.8 Shapes of slip lines with variation of the depth of embedment

根据图 8 可以得到如下结论:

(1) 基础埋深的增加会削弱土的重度对滑移线区域及过渡区顶角的影响, 使滑移线区域及过渡区顶角更接近无重土的情况。

(2) 对有重土, 基础埋深的增加引起土的滑移线区域增大, 必然会引起极限状态平衡时参与平衡的土的重量增加, 也就是说, 基础埋深的增加对有重土而言会引起地基极限承载力 γN_γ 项的增加。而对同种土(即 γ 为定值), 基础埋深的增加(q 的增加)还将引起 N_γ 值的小幅度增大。

(3) 基础埋深虽对有重土的滑移线有影响, 但这种影响是有限的, 它不可能使滑移线区域超出同

种条件下无重土的滑移线(图8虚线)范围。

(4) 对有埋深基础,随着基础埋深的增加,太沙基和梅耶霍夫忽略土的重度对滑移线形状的影响这一假设带来的误差会越来越小。

5.4 基础与基底土摩擦角对土的滑移线形状的影响

前面对滑移线形状的讨论都是建立在基础与基底土无摩擦的情况下进行的。下面讨论基础粗糙程度对基底土滑移线形状的影响。

当 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 30^\circ$, $q = 27 \text{ kPa}$ 时,分别取基础与地基土的摩擦角 δ 等于 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° 进行计算,计算得到的土的滑移线形状如图9所示。

由图9可以得到以下结论:

(1) 随着基础与基底土摩擦角的增大,滑移线范围变大,地基的承载力就会越高,同时,极限状态下土的剪切破坏面就会越大。但与土的内摩擦角相比,基底的粗糙程度明显没有土的内摩擦角对滑移线形状的影响大。

(2) 随着基础与基底土摩擦角的增大,极限状态时土的剪切破坏区域变大,过渡区顶角范围也逐渐变大。这种作用刚好与土体重度使土体过渡区顶角减小的作用抵消,一定程度上抵消了土的过渡区顶角受土体参数的影响。

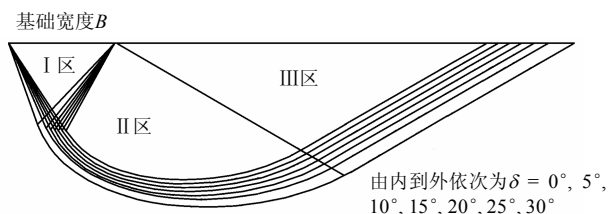


图9 基础不同埋深时土的滑移线形状图
($\varphi = 30^\circ$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$)

Fig.9 Shapes of slip lines with variation of the roughness of the foundation base

6 结 论

(1) 将程序得到土的极限承载力值与索科洛夫斯基的计算结果进行了对比,结果发现本文计算结果比索科洛夫斯基的计算结果大,原因在于本文得到的承载力系数 N_γ 比索科洛夫斯基给出的大。

(2) 得到了土的内摩擦角与地基承载力系数 N_γ 的对应表,并将得到的计算结果与经典结果进行了对比,结果表明,本文得到的 N_γ 与 W. F. Chen 的有限元法结果的上限解、魏锡克的理论解和陈祖煜斜

条分法的计算结果接近。

(3) 较全面的讨论了土体滑移线形状的影响因素,分析了无埋深基础太沙基和梅耶霍夫忽略地基土重度对滑移线形状影响这一假设对承载力计算带来的问题,并较好的解释了太沙基和梅耶霍夫的试验结果。

(4) 研究了土的过渡区顶角的影响因素。从文中分析可看出,地基土重度使得过渡区顶角减小,而土的内摩擦角、基础埋深以及基础与地基的摩擦起到削弱地基重度对过渡区顶角影响的作用。但是,这些因素对过渡区顶角的影响是综合的、复杂的,其定量关系还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] B. B. 索科洛夫斯基著. 松散介质静力学[M]. 徐志英译. 北京: 地质出版社, 1956.
- [2] Chen W F. Limit Analysis and Soil Plasticity[M]. New York: Elsevier Scientific Co., 1975.
- [3] 栾茂田, 林皋, 郭莹. 土体稳定分析的改进滑楔模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 1-9.
LUAN Mao-tian, LIN Gao, GUO Ying. Generalized sliding-wedge method and its application to stability analysis in soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(4): 1-9.
- [4] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [5] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.
- [6] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [7] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 1-11.
CHEN Zu-yu. Limit analysis for the classic problems of soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 1-11.
- [8] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1944.
- [9] Meryerhof G G. The ultimate bearing capacity of foundations[J]. Geotechnique, 1951, II, 301-331.