

黏性土边坡上条形基础临坡安全距离计算

聂永鹏¹, 刘魁², 赵阳¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054; 2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西西安 710054)

摘要: 以坡顶条形荷载作用下的黏性土边坡为研究对象, 运用瑞典条分法并结合极限平衡理论, 分析推导出条形基础临坡安全距离的数学表达式, 然后通过有限元软件对一处实际案例进行模拟计算, 验证了数学表达式的可靠性。

关键词: 黏性土坡; 条形基础; 临坡安全距离; 瑞典条分法; 数学表达式

中图分类号: TU471.12

文献标志码: A

Calculation of strip foundation safety distance on clay slope

NIE Yongpeng¹, LIU Kui², ZHAO Yang¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, 710054, China; 2. Research Institute of electronic comprehensive survey of the Ministry of information industry, Xi'an, 710054, China)

Abstract: Taking the top bar loads of clayey soil slope as the research object, the mathematic expression of the safe distance is deduced by using the Swedish article points method and limit equilibrium theory. Then the finite element numerical simulation on a practical engineering case is calculated, and the reliability of the mathematical expression is verified.

Key words: cohesive soil slope; strip footing; safety distance; Sweden slice method; mathematical expression.

我国约三分之二的国土为山区丘陵地带, 随着人口的快速增长, 越来越多的城市开始开发山地, 选择在山地边坡上修建建筑物^[1], 这样做虽然可以有效利用土地资源, 但也存在着安全问题: 如果建筑物距坡顶过近, 则建筑物所产生的荷载会增加边坡失稳的风险, 从而使建筑物的整体稳定性大大降低, 对当地居民的生命财产安全构成巨大威胁。因此, 在坡上修建建筑物时必须合理控制基础距坡顶的水平距离^[2]。鉴于此, 中国颁布了《建筑地基基础设计规范》^[3], 但通过观察可以发现该规范公式存在诸多不合理之处: 建筑物基础临坡安全距离只和基础宽度、基础埋深及边坡坡角有关, 且完全忽视了坡顶荷载和坡体抗剪强度指标等因素的影响。其实, 影响建筑物临坡安全距离的因素很多^[4-5]。目前关于边坡稳定的分析方法和平地上基础承载力的确定方法都比较成熟^[6-8], 但关于建筑物临坡安全距离的研究相对较少^[9-13]。以上研究虽然成果颇丰, 但是均

未给出确定黏性土坡上基础安全距离的合理有效的方法, 因此本文以土体极限平衡理论为依据, 运用瑞典条分法推导出条基临坡安全距离的数学表达式, 以期为山地建设的设计施工提供参考。

1 基本原理与假定

由于在实际情况中, 黏性土坡数量相对更多, 因此本文选择黏性土边坡作为主要研究对象。均质黏性土边坡满足对数螺旋破坏模式^[14-16], 即边坡滑动面为对数螺旋线曲面, 形状近似于圆柱面, 在断面上即为圆弧面^[17]。同时山地乡镇中较为常见的滑坡发育类型为堆积层滑坡, 且以中小型浅层滑坡为主, 滑坡主要变形失稳模式为蠕滑-拉裂-转动圆弧滑动^[18]。故而, 本文将均质黏性土边坡的滑动面假定为圆弧面, 继而展开相关研究。

当建筑物基础埋置于地面以下时, 埋深范围内

收稿日期: 2018-03-30

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划 (2014KTDZ03-01-02); 陕西省重点研发计划 (2017ZD-SF-087)

作者简介: 聂永鹏 (1994-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为水文地质与工程地质。

的土体自重会抑制破坏面的发展从而提高地基承载力^[19]。而根据赵志峰等人的研究发现,基础埋置深度的增加虽然使地基承载力有所提高,但由于浅基础的埋深有限,所以对相对安全距离的取值并无实质影响^[2]。因此在理论推导中将不考虑基础埋深这一因素,这种忽略是可行的,而且不考虑基础埋深的计算结果相对于有埋深的情况更加偏于安全。

理论推导之前,给出以下假定:(1)对边坡模型进行适当简化:边坡的坡顶、坡面及坡底形状均为直线形,最危险滑动面通过坡脚;(2)对边坡的边界条件做出规定:底部边界施加全约束,左右边界为水平约束,其它边界为自由端^[20]; (3)计算中不考虑地表和地下水的渗流作用,只考虑自重应力及外荷载对边坡应力与位移的影响,而且整个变形过程中,滑动面上各点的位移满足变形相容条件^[21]。

2 基础安全距离的理论推导

以条形荷载下的黏性边坡稳定分析为切入点,以边坡极限平衡理论为依据,运用瑞典条分法进行基础临坡安全距离的理论推导。计算简图如图1:

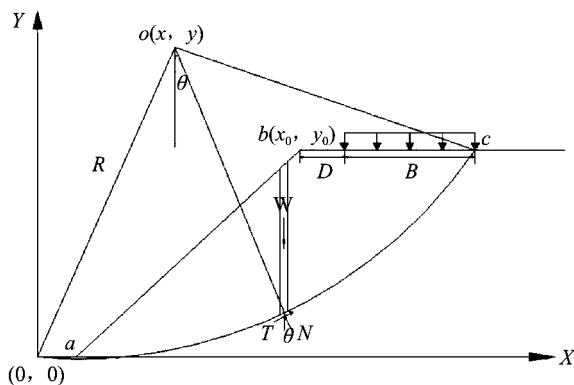


图1 计算简图

Fig.1 The schematic diagram

瑞典条分法认为条块间的作用力对边坡的整体稳定性影响不大,可以忽略,或者说,假定条块两侧的作用力大小相等,方向相反且作用于同一直线上。首先从坡体中取出条块进行分析,如图2,由于不考虑条块间的作用力,则作用在条块*i*上的力为重力 w_i 、滑动面上切向应力 T_i 和法向应力 N_i 。根据径向力的平衡条件,有: $N_i = W_i \cos \theta_i$

根据滑弧面上极限平衡条件,有:

$$T_i = \frac{T_{fi}}{F_s} = \frac{c_i l_i + N_i \tan \theta_i}{F_s} \quad (1)$$

式中, T_{fi} —条块*i*在滑动面上的抗剪强度; F_s —滑动圆弧的安全系数。

由于在式(1)中, $T_i \neq W_i \sin \theta_i$,因此条块的力多边形不闭合,即此法不满足单个条块的静力平衡条件。按整体力矩平衡条件,外力对圆心力矩之和为零。在条块的三个作用力中,法向应力 N_i 通过圆心不引起力矩,则对于条块*i*只有重力 W_i 和滑动面上切向应力 T_i 的对圆心产生力矩。重力产生滑动力矩为 $\sum W_i d_i = \sum W_i R \sin \theta_i$,滑动面上抗滑力产生的抗滑力矩为 $\sum T_i R = \sum \frac{c_i l_i + N_i \tan \theta_i}{F_s} R$,则对于所有的土条*i*根据力矩平衡有:

$$\sum W_i d_i = \sum T_i R$$

$$\text{即} \sum W_i R \sin \theta_i = \sum \frac{c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \theta_i}{F_s} R$$

然后取出条块*j*分析,如图3,不考虑条块间的作用力,则此时作用在条块*j*上的力,除了重力 W 、滑面上的切向应力 T 和法向应力 N 之外,尚有坡顶条形荷载 p 。根据径向力的平衡条件有: $N_j = (W_j + q b_j) \cos \theta_j$ 。

根据滑弧面上极限平衡条件,有 $T_i = \frac{T_{fi}}{F_s} =$

$$\frac{c_i l_i + N_i \tan \theta_i}{F_s}, \text{式中符号同上。}$$

对于条块*j*,重力和坡顶条形荷载产生的滑动力矩为:

$$\sum W_i d_i = \sum W_i R \sin \theta_i$$

滑动面上抗滑力产生的抗滑力矩为:

$$\sum T_i R = \sum \frac{c_i l_i + N_i \tan \theta_i}{F_s} R$$

则对于所有的土条*j*根据力矩平衡有:

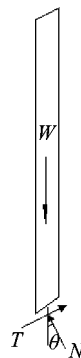


图2 *i* 条块受力示意图
Fig.2 The force diagram of the bar *i*

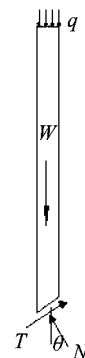


图3 *j* 条块受力示意图
Fig.3 The force diagram of the bar *j*

$$\sum W_j R \sin \theta_j + qB \left(X_j - X + D + \frac{B}{2} \right) = \frac{\sum c_j l_j + [(W_j q b_j) \cos \theta_j] \operatorname{tg} \theta_j}{F_s} R$$

进而对于整个黏性土边坡而言，因为整体力矩平衡，即 $\sum M=0$ ，故将所有的 i 和 j 条块综合考虑得：

$$\sum W_i R \sin \theta_i + \sum W_j R \sin \theta_j + qB \left(X_0 - X + D + \frac{B}{2} \right) = \frac{\sum c_i l_i + W_i \cos \theta_i \operatorname{tg} \theta_i}{F_s} R + \frac{\sum c_j l_j + [(W_j q b_j) \cos \theta_j] \operatorname{tg} \theta_j}{F_s} R \quad (2)$$

可得条形基础临坡距离为

$$D = \frac{1}{qB} \left[\sum \frac{c_i l_i + W_i \cos \theta_i \operatorname{tg} \theta_i}{F_s} R + \sum \frac{c_j l_j + [(W_j + q b_j) \cos \theta_j] \operatorname{tg} \theta_j}{F_s} R - \sum W_i R \sin \theta_i - \sum W_j R \sin \theta_j \right] - \frac{B}{2} - x_0 + x \quad (3)$$

对于式中未知量的确定方法：对于边坡安全系数，《建筑地基基础设计规范(GB 5007-2011)》规定滑坡推力安全系数对一级建筑取1.30，二级建筑取1.20，三级建筑取1.10^[3]。在斜坡上修建的民用建筑物一般属于二级建筑，即边坡安全系数 F_s 取1.20；对于滑动面圆心横坐标 x_0 与半径 R 的确定，见图4，根据费伦纽斯提出的经验方法^[22]可大致确定最危险滑动面。

3 算例分析

为验证上文所得数学表达式的可靠性，现以延安某处黏性土边坡为实例进行分析计算。均质黏性

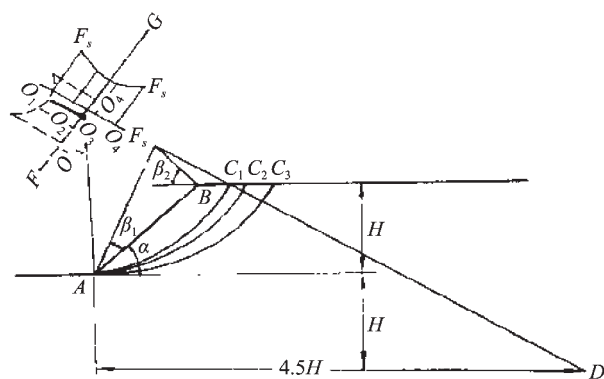


图4 最危险滑动圆心的确定方法

Fig.4 Determination of the most dangerous sliding center

土坡高25 m，坡比1:2，该地民用建筑物多为两层砖混结构，条形基础，荷载一般取 $q=100$ kN/m。岩土体物理力学参数见表1：

表1 岩土体物理力学参数表

Tab.1 Rock strength parameters

土体	重度 (KN·m ⁻³)	粘聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /°
黏土	20	10	24.87

3.1 有限元模拟

利用FLAC 3D有限元软件对该案例中的边坡稳定性进行模拟计算^[23]：首先在未加载条件下，计算得到边坡安全系数 $F_s=1.31$ ，这与常用的有限元强度折减法^[24]所求得的安全系数值误差为1.43%，说明使用FLAC3D软件所得的安全系数具有一定的可靠性。然后在距离坡顶边缘 $L=0$ 位置处施加8 m宽，大小为100 kN/m条形荷载，然后将荷载临坡距 L 由零开始不断增加，通过不断试算，发现当条形荷载距离边坡坡肩的距离大约为9 m，边坡的安全系数为 $F_s=1.22>1.2$ ，满足规范要求，也即是数值模拟得到的安全临坡距约为9 m。

3.2 理论计算分析

首先将上述斜坡土体竖直分成8条，根据费伦纽斯经验方法得到最危险滑动面的圆心在(10, 110)附近，半径约为 $R=70$ m，如图5。然后按照瑞典条分法进行分项计算见表2和表3。

将表2、表3数据代入式(3)中，得 $D \approx 10$ m。

通过对比数值模拟结果可发现，二者结论相对符合，而数学表达式计算结果更偏于安全，说明根据式(3)所得的条形基础临坡安全距离具有一定的可靠性，是可信的。

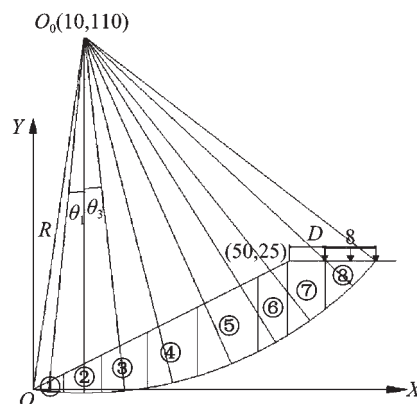


图5 计算示意图

Fig.5 Calculation diagram

表 2 分项计算表 1
Tab.2 Itemized schedule 1

条块 编号	θ_i /°	W_i /kN	$\sin\theta_i$	$\cos\theta_i$	$W_i\sin\theta_i$ /kN	$W_i\cos\theta_i$ /kN	$W_i\cos\theta_i\tan\varphi_i$ /kN	l_i /m	$c_i l_i$ /kN
1	-6.93	212.5	-0.12	0.99	-25.64	210.95	105.47	8	80
2	0	800	0.00	1.00	0.00	800.00	400.00	10	100
3	9.29	1 600	0.16	0.99	258.29	1 579.01	789.51	10.5	105
4	13.29	2 340	0.23	0.97	537.92	2 277.33	1 138.67	11.5	115
5	23.37	2 625	0.40	0.92	1 041.25	2 409.65	1 204.83	14	140
6	32.46	1 700	0.54	0.84	912.41	1 434.40	717.20	10	100
7	38.46	1 720	0.62	0.78	1 069.79	1 346.83	673.42	10.5	105

表 3 分项计算表 2
Tab.3 Itemized schedule 2

条块 编号	θ_j /°	W_j /kN	$\sin\theta_j$	$\cos\theta_j$	$W_j\sin\theta_j$ /kN	$W_j\cos\theta_j$ /kN	$(W_j+qb_j)\cos\theta_j\tan\varphi_i$ /kN	L_j /m	$c_j l_j$ /kN
8	47	900	0.73	0.68	658.22	800	579.70	14	140

4 结论

1) 本文通过瑞典条分法对黏性土边坡展开理论分析，推导出了斜坡上条形基础临坡安全距离 D 的通用计算公式。

2) 文章所得数学表达式较为充分地考虑了土体抗剪强度对黏性土坡上条形基础临坡安全距离的影响，一定程度上弥补了规范公式的不足。

3) 经过验证，文章所得数学表达式具有一定可靠性，可将其应用于山地村镇斜坡建筑物安全距离的预测，并可将预测值作为斜坡建筑物临坡位置选择和设计的依据。

参考文献：

[1] 刘娅南, 严亮. 陕北丘陵山区城市规划与当地资源环境关系的初探 [J]. 价值工程, 2015, 34(2): 58-60.

[2] 文继东. 考虑坡顶建筑荷载影响的边坡稳定性及加固设计优化研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.

[3] GB5007-2011, 建筑地基基础设计规范 [S].

[4] 何思明, 张晓曦, 欧阳朝军. 条形基础荷载对边坡稳定性影响与加固研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1980-1986.

[5] 何思明, 张晓曦, 罗渝. 坡顶条形荷载作用边坡潜在滑裂面与稳定性分析 [J]. 山地学报, 2011, 29(1): 95-100.

[6] KESKIN M S, LAMAN M. Model studies of bearing capacity of strip footing on sand slope [J]. KSCE Journal of

Civil Engineering, 2013, 17(4): 699 – 711.

[7] 何欢, 付成华, 钟学梅, 等. 强度折减法在边坡稳定性分析中的应用 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(3): 31-33.

[8] HUANG C C, KANG W W. The effects of a setback on the bearing capacity of a surface footing near a slope [J]. Journal of Geo-Engineering, 2008, 3(1): 25 – 32.

[9] 罗智. 坡顶荷载对边坡稳定性影响研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 10(7): 33-37.

[10] 赵志峰, 韦张林. 黏性土边坡上条形基础安全距离分析 [J]. 林业工程学报, 2017, 2(1): 130-134.

[11] BOWLES J E. Foundation analysis and design [M]. 5th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 1996.

[12] 许锡昌, 陈善雄, 姜领发. 斜坡地基附加应力分布规律模型试验及数值模拟 [J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 267-273.

[13] 罗强, 李亮, 赵炼恒. 水力和超载条件下锚固岩石边坡动态稳定性拟静力分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3585-3593.

[14] YANG Xiaoli, YIN Jianhua. Slope stability analysis with non-linear failure criterion [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130: 267–273.

[15] AUSILIO E, CONTE E, DENTE G. Stability analysis of slopes reinforced with piles [J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28: 591–611.

[16] YANG Xiaoli. Seismic displacement of rock slopes with nonlinear Hoek–Brown failure criterion (下转第 53 页)

下道路底板和两侧围护墙形成的围合区域内部,体现了围护墙对土体位移发展的阻隔作用;同时地下道路变形缝也会对土体沉降产生隔断作用。

3) 盾构施工主要引起地下道路顶板和底板在隧道拱顶上方的附加变形,而对地下道路侧墙的变形影响可以忽略。

4) 和半无限空间土体相比,三面围合下盾构隧道衬砌环的“横鸭蛋”弯曲程度有所减弱。

参考文献:

- [1] LOGANATHAN N, POULOS H G, XU K J. Ground and pile-group response due to tunneling[J]. Soil and Foundations, 2001, 41(1): 57-67.
- [2] 黄茂松, 张宏博, 陆荣欣. 浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1379-1383.
- [3] 黄 栩, 黄宏伟, 张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1241-1249.
- [4] ONG C W, LEUNG C F, YONG K Y, et al. Centrifuge modeling of pile responses due to tunneling in clay[J]. Underground Singapore, 2005, 128(4): 327-336.
- [5] 张晓清, 张孟喜, 吴应明, 等. 多线叠交盾构隧道近接施工模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 1040-1045.
- [6] 张在明, 韩 焯. 城市隧道施工引起建筑物变形的损坏评估[J]. 木工程学报, 2011, 44(5): 123-130.
- [7] 张明聚, 赵 明, 王 鹏程, 等. 小净距平行盾构隧道施工先行隧道管片附加应力监测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2121-2126.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第48页)
- [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44: 948-95.
- [17] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 246-250.
- [18] 张泽林. 典型黄土滑坡启动机制及成灾模式研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [19] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 200-206.
- [20] 赵志峰, 杨 帆. 刚性下卧层对地基变形影响的计算方法[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(5): 139-142.
- [21] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21-27.
- [22] DUNCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 22(7): 577-596.
- [23] 季 聪, 仵 磊, 马 宏, 等. FLAC 3D 强度折减理论在边坡稳定分析中的应用[J]. 世界地质, 2013, 32(1): 158-164.
- [24] 田光辉, 刘之葵, 肖 波. 用有限元强度折减法分析边坡稳定性[J]. 路基工程, 2011(1): 48-53.
- (责任编辑 王利君)