

倾斜荷载下的地基边坡极限承载力分析

吴建平

(江西省鹰潭市水利电力勘测设计院,江西 鹰潭 335001)

摘要:为了研究倾斜荷载作用下地基边坡的极限承载力,本文采用有限元数值模拟及理论计算相结合,建立合理的有限元模型并计算相应模型在倾斜荷载作用下地基边坡的极限承载力。结果表明:地基边坡在失稳破坏前,等量增加倾斜荷载,其安全系数减小幅度随着地基边坡角度的增加逐渐变缓;通过有限元数值模拟以及理论计算公式都可以得到倾斜荷载下地基边坡的极限承载力大小,并且两者的误差较小,鉴于计算简易程度可得,利用有限元数值计算地基边坡的极限承载力更加简单;地基边坡在倾斜荷载作用下,随着边坡角度的增加,其极限承载力逐渐减小,并且坡角越大减小幅度越大。

关键词:地基边坡;倾斜荷载;数值计算;安全系数;极限承载力

中图分类号:P642;TU459

文献标识码:A

文章编号:1004-4701(2018)04-0235-05

作为经典土力学的三个主要领域之一的地基承载力问题,虽已被全世界学者不断研究数年,甚至是数十年,但是在实际工程中,依旧存在一些问题无法完美的解决。在如今我国这个高土地利用率的国度,倾斜荷载作用下的地基承载力计算在岩土工程、土木工程甚至是水利工程中就尤为突出^[1-4]。

目前学术界对以上问题越来越重视,已经有不少学者取得了一定意义的成果,并通过不同的研究手段(物理模型、理论推导等等)^[5-8]得到了特定条件下地基极限承载力的计算方法和公式。对此,根据不同的情况(土体材料参数、荷载施加方法等)采用不同的计算方法和公式,并且地基承载力问题作为工程设计重要因素,所以采用科学合理的计算方法将有助于工程建设事业。因此,本文在前人的研究基础上,采用理论计算和数值计算结合的手段,分析了边坡坡角对倾斜荷载下条形地基极限承载力的影响。

1 地基极限承载力分析

1.1 Terzaghi 公式

地基处于稳定与破坏临界点时所能承受的最大承载力即为地基的极限承载力^[9,10]。早期只针对水平地基极限承载力进行研究,随着学术的不断深入与改进,

Terzaghi 公式进入公众视野,并不断得到认可,并且广泛被应用,其表达式如下:

(1)基础埋深不为0时:

$$P_u = \frac{\gamma b}{2} N_\gamma + c N_c + q N_q \quad (1)$$

(2)当基础埋深为0时:

$$P_u = \frac{\gamma b}{2} N_\gamma + c N_c \quad (2)$$

式中: P_u 为地基的极限承载力,kPa; N_γ 、 N_c 、 N_q 为不同的水平地基极限承载力系数; γ 为土体的重度,kN/m³; b 为地基承载力宽度,m; q 为均布荷载大小,kPa; c 表示土体材料的粘聚力参数,kPa。

水平地基极限承载力研究在不断的完善与突破后,学者们逐渐关注边坡与地基的结合形式以及荷载形式,并对其新型结构形式的极限承载力进行研究。

1.2 倾斜荷载下的极限承载力

在倾斜荷载作用下条形基础下的二维机动地基土许可单侧剪切破坏模型如图1。根据相关参数并通过扇形条分原理进行计算,最后能够得到一条潜在破裂面。

其中, B 为基础宽度,m; n 为整个地基的扇形条分数,可视为 n 个三角形块体; α_i 为任意块体的顶角,°; β_i 为任意三角形土块底边与条间间断面的夹

角,°; α_j 为第 j 块块体的顶角,°; β_j 为第 j 块三角形土块底边与条间间断面的夹角,°。

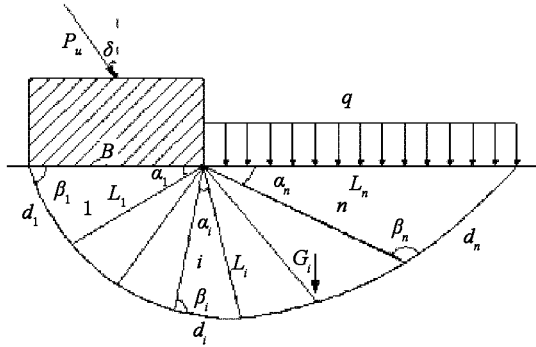


图1 条形地基理论计算模型

(1) 根据几何关系以及正弦定理计算间断面长度和潜在破裂面长度:

$$L_i = \prod_{j=1}^i \frac{\sin \beta_j}{\sin(\alpha_j + \beta_j)} B \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$d_i = \prod_{j=1}^i \frac{\sin \beta_j}{\sin(\alpha_j + \beta_j)} \frac{\sin \alpha_i}{\sin \beta_i} B \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (4)$$

任意块体的重力为:

$$G_i = \frac{1}{2} \gamma L_i d_i \sin(\alpha_i + \beta_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (5)$$

式中: L_i 为第 i 块三角块的间断面长度, m; d_i 为第 i 块三角块的破裂面长度, m; γ 为土体的重度, kN/m³。

(2) 基础在滑移过程的速度为:

$$V_p = \frac{\sin \beta_i}{\sin(90^\circ + \delta + \beta_i)} V_1 \quad (6)$$

块体在潜在破裂面上的速度为:

$$V_{i+1} = \frac{\sin(\alpha_i + \beta_i - \varphi - \bar{\varphi})}{\sin(\beta_{i+1} - \varphi - \bar{\varphi})} V_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (7)$$

块体间断面上的速度为:

$$U_i = \frac{\sin(\alpha_i + \beta_i - \beta_{i+1})}{\sin(\beta_{i+1} - \varphi - \bar{\varphi})} V_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (8)$$

(3) 通过倾斜荷载、均布荷载以及自身重力可以计算其外功率, 公式如下:

$$W_s = \sum_{i=1}^n G_i V_i \sin(\beta_i - \varphi - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j) \quad (9)$$

$$W_q = L_n V_n \cos\left(\frac{3}{2}\pi + \varphi - \alpha_n - \beta_n\right) \quad (10)$$

$$W_p = P_u V_p \cos\left(\frac{1}{2}\pi + \varphi - \beta\right) \quad (11)$$

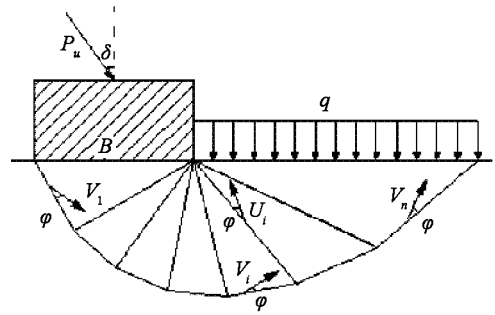


图2 条形地基速度场计算模型

式中: W_s 、 W_q 、 W_p 分别表示为重力功率、均布荷载功率以及极限承载力 P_u 的功率, J; ψ 为内摩擦角,°。

根据内能耗散原理, 视条形基础为刚性, 土体为理想材料, 则视为内能消散只存在条间断面以及破裂面上。

破裂面上能量消散功率公式为:

$$S_p = c \sum_{i=1}^{n-1} U_i L_i \cos \varphi \quad (12)$$

$$S_d = c \sum_{i=1}^n V_i d_i \cos \varphi \quad (13)$$

式中: S_p 、 S_d 分别表示为破裂面和间断面上的能量消散功率, kJ; c 表示土体材料的粘聚力参数, kPa。

通过极限分析上限以及虚功原理得到:

$$W_s + W_q + W_p = S_p + S_d \quad (14)$$

$$P_u = \frac{S_p + S_d - W_s - W_q}{V_p \cos\left(\frac{1}{2}\pi + \varphi - \beta\right)} \quad (15)$$

因此, 可以得出地基的极限承载力 P_u 是关于潜在破裂面破坏角 β 的函数, 因此可以通过以下公式计算极限承载力以及潜在破裂面:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_u}{\partial \beta_1} &= 0 \\ \frac{\partial P_u}{\partial \beta_2} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial P_u}{\partial \beta_n} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

2 数值模拟

2.1 模型建立

根据某工程为背景,利用大型岩体有限元数值模拟软件(MIDAS - GTS NX)建立条形基础地基计算模型应该适当的简化,研究其主导因素。因此本次模型将从以下几个方面进行简化:

- (1) 边坡材料采用平面应变问题进行模拟;
- (2) 坡面采用光滑坡面,即直线处理;
- (3) 基础为条形基础,荷载在模型中可视为直接加载在坡顶面上,并采用均布荷载。

具体简化模型见图3。

其中 Q 为顶部面施加均布荷载, kPa; 荷载作用方向 α 为 45° , B 为荷载作用宽度(即条形基础长度), m; 土体材料采用摩尔库伦模型,其 γ 为容重, kN/m^3 ; c 为粘聚力, kPa; φ 为内摩擦角, $^\circ$; E 为弹性模量, MPa, 取值为 120 MPa; ν 为泊松比, 取值为 0.25。

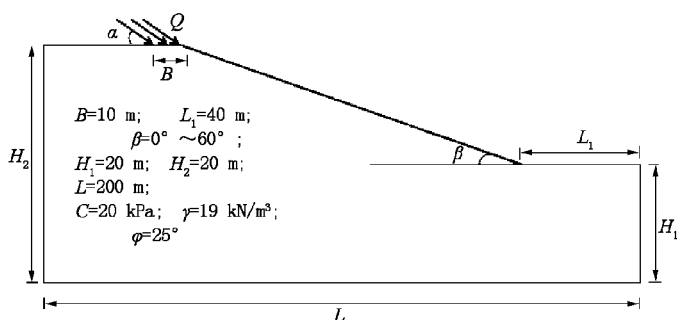


图3 简化模型

本次模型为均质土质边坡,边坡模型的尺寸参数见简化模型。为研究其边坡坡角对倾斜荷载下条形地基极限承载力的影响,对边坡坡角进行改变,建立不同坡角大小的计算模型,即模型从水平地基(坡角为 0° , 即模型为 $L \times H_1 = 200 \text{ m} \times 20 \text{ m}$)、坡角为 10° 边坡地基、坡角为 20° 边坡地基,一直到边坡坡角为 60° 边坡地基,总共 7 个模型。

2.2 边界及计算工况

将以上 7 个简化模型分别建立有限元模型,并通过有限元软件进行网格划分,统一网格大小为 2 m; 有限元模型中的两侧约束水平方向的位移,底部约束水平方向和竖直方向的位移; 计算工况设定为上部条形基础区域施加均布倾斜荷载($\alpha = 45^\circ$),并不断等量增加均布

荷载,当模型计算达到失稳状态后停止计算(本次有限元计算施加最大荷载为 400 kN/m)。

2.3 计算方法

本次采用有限元强度折减法对施加均布倾斜荷载下的边坡模型安全系数进行计算。

3 分析及讨论

3.1 倾斜荷载下地基边坡极限承载力数值分析

通过有限元软件对以上模型计算可得对应不同坡角大小下地基的安全系数,并通过安全系数为 1.00 时施加的荷载作为倾斜荷载下地基极限承载力。总而言之,在边坡高度和基础上倾斜荷载一定的情况下,坡角越大,其安全系数越小;在同一模型下,随着基础上的倾斜荷载的增加,其安全系数逐渐降低。图4为不同坡角下模型在倾斜荷载与安全系数之间的关系曲线。

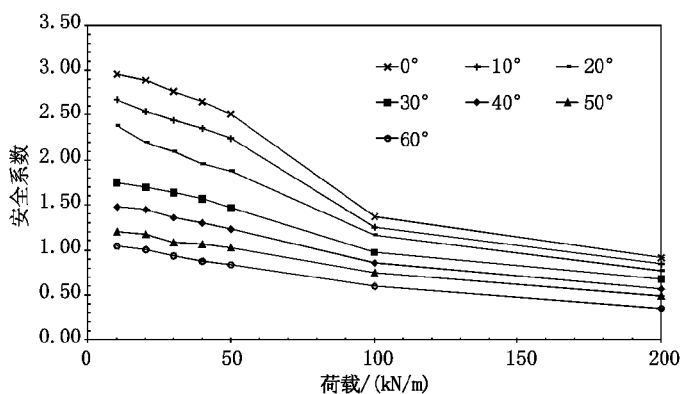


图4 倾斜荷载与安全系数关系曲线

由图4可知,当条形基础下地基的坡角由 0° 逐渐增加到 60° 时,采用有限元强度折减法计算,随着条形基础上部倾斜荷载不断增加,将逐渐使地基边坡的稳定性降低,即地基边坡的安全系数逐渐变小。

当边坡在没有发生失稳破坏以前,即安全系数大于 1.00 时,地基边坡角度越小,随着倾斜荷载的等量增加,安全系数降低越缓慢。可能是因为地基边坡坡高一定,角度越小,坡面越缓,越接近地基的性质;而地基边坡坡角越大,其性质越接近边坡,在相同材料参数及倾斜荷载下,边坡相对于地基更容易破坏;同时地基的初始安全系数相比边坡的安全系数更高,在等量倾斜荷载作用下的变化量更大。

综上所述,本次有限元数值模拟能够得到地基边坡

安全系数与施加在基础上倾斜荷载之间的关系,并通过其关系曲线能够计算出倾斜荷载下不同坡角地基边坡的极限承载力。

3.2 倾斜荷载下地基边坡的极限承载力计算

通过以上模型的建立,并通过有限元数值计算以及

数据处理可以得到倾斜荷载下不同地基边坡的极限承载力,即根据数值模拟计算结果,计算出当地基边坡的安全系数为 1.00 时所对应的基础上部倾斜荷载大小。同时根据 1.2 节中倾斜荷载下的极限承载力计算出地基边坡的极限承载力大小,具体数据见表 1。

表 1 倾斜荷载下地基边坡计算承载力大小

模型(地基边坡角度)	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
数值计算/kPa	223.2	200.3	169.9	113.3	72.4	36.1	18.9
理论计算/kPa	215.2	196.4	165.3	106.4	68.3	38.2	19.2
误差/%	3.72	1.99	2.78	6.48	6.00	5.50	1.56

根据理论计算和数值模拟计算结果显示,两者计算结果误差相对较小,最大误差为 6.48%,因此有限元数值模拟能够较为准确的计算出倾斜荷载下地基边坡的极限承载力大小。

根据数值计算以及理论计算得出的倾斜荷载下地基边坡极限承载力,可以看出随着地基边坡角度的增加,其极限承载力不断减小;并且随着坡角增加的越大,其减小程度越大。图 6 为倾斜荷载下边坡坡角与地基极限承载力变化曲线。

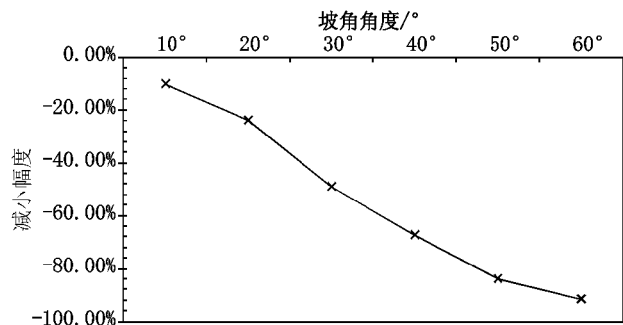


图 6 倾斜荷载下边坡坡角与地基极限承载力变化曲线

4 结 论

(1)通过有限元强度折减法进行数值计算,能够得出地基边坡在失稳破坏前,等量增加倾斜荷载,其安全系数减小幅度随着地基边坡角度的增加逐渐变缓;

(2)通过有限元数值模拟以及理论计算公式都可

以得到倾斜荷载下地基边坡的极限承载力大小,并且两者的误差较小,鉴于计算简易程度可得,利用有限元数值计算地基边坡的极限承载力更加简单;

(3)地基边坡在倾斜荷载作用下,随着边坡角度的增加,其极限承载力逐渐减小,并且坡角越大减小幅度越大。

参考文献:

[1] 余新才,李剑,尚义敏,等.斜坡地基承载力及其影响因素的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2012,35(12),1671~1815.

[2] 陈惠发. 极限分析与土体塑性[M]. 北京:人民交通出版社,1995.

[3] Zhu H H, Wang Z Y, Shi B, et al. Feasibility study of strain based stability evaluation of locally loaded slopes; Insights from physical and numerical modeling[J]. Engineering Geology, 2016, 208: 39~50.

[4] 孔位学,郑颖人,赵尚毅,等. 地基承载力的有限元计算及其在桥梁中的应用[J]. 土木工程学报,2005(04): 97~102.

[5] 王晓谋,徐守国. 斜坡上的地基承载力的有限元分析[J]. 长安大学学报(自然科学版),1993(03): 13~17.

[6] 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.

[7] 赵杰,邵龙潭. 有限元稳定分析法在确定土体结构极限承载力中的应用[J]. 水利学报,2006,37(6): 668~673.

[8] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3): 343~346.

[9] 赵杰,邵龙潭. 土体结构极限承载力的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S1): 3183~3189.

[10] 邓楚键,唐晓松,郑颖人. 载荷试验有限元数值模拟[J]. 岩土力学, 2007(S1): 249~253.

编辑:张绍付

Analysis of ultimate bearing capacity of slope under tilting load

WU Jianping

(Yingtan Municipal Water Conservancy and Electric Power Investigation and Design Institute, Yingtan 335001, China)

Abstract: In order to study the ultimate bearing capacity of slope under inclined load, this paper combines the finite element numerical simulation and theoretical calculation to establish a reasonable finite element model and calculate the ultimate bearing capacity of the corresponding slope under inclined load. The results show that before the failure of instability, the inclined slope of foundation slope increases in equal amount, and the decrease of safety factor will gradually decrease with the increase of slope angle of foundation slope. Through the finite element numerical simulation and theoretical calculation formula under the inclined load, the ultimate bearing capacity of foundation slope is small, and the error between the two is small. In view of the simplicity of calculation, the ultimate bearing capacity of foundation slope calculated by finite element numerical method is more simple. Under the action of inclined load, with the increase of slope angle, the ultimate bearing capacity decreases gradually, and the larger the slope angle is, the larger the decreasing range is.

Key words: Foundation slope; Tilting load; Numerical calculation; Safety factor; Ultimate bearing capacity

翻译: 吴建平

江西省水利厅印发实施乡村振兴战略行动方案

近日,江西省水利厅发布了《江西省水利厅实施乡村振兴战略行动方案》(以下简称《方案》)。《方案》对水利服务实施乡村振兴战略总体思路、主要内容和保障措施作出了明确规定。

《方案》提出,要以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导,全面贯彻党的十九大精神和中央、省委关于实施乡村振兴战略的决策部署,紧紧围绕统筹推进“五位一体”总体布局和协调推进“四个全面”战略布局,贯彻新发展理念,深入落实“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时代水利工作方针和水资源、水生态、水环境、水灾害统筹治理的治水新思路。以着力解决制约乡村振兴的水利问题为导向,以实现乡村振兴全面建成小康社会为目标,按照“产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕”的总要求,着力解决好乡村水问题,科学规划农村生产、生活、生态三个空间布局,加快促进农业“稳粮、优供、增效”、农村“整洁美丽、和谐宜居”、农民“脱贫、致富、文明”,持续提升农民的获得感、幸福感和安全感,努力让农业强起来、农村美起来、农民富起来,为我省实施乡村振兴战略提供强有力的水利支撑和保障。

江西水利服务实施乡村振兴战略的主要目标是:到2020年,乡村防汛抗旱减灾体系、农田灌溉和高效利用体系、农村供水安全体系、水生态文明体系基本形成并不断完善,建成与全面小康社会相适应的水利保障体系。到2035年,全省水利现代化基本实现。到2050年,根据全面建成社会主义现代化强国的目标要求,全面实现水利现代化,水安全保障能力全面提升。

江西水利服务实施乡村振兴战略要人水和谐、绿色发展;以人为本、服务民生;提质升级,夯实基础;城乡融合、全面振兴为基本遵循。

江西水利服务实施乡村振兴战略,具体实施五大行动方案。一是筑牢洪涝灾害防线,解决乡村易淹、易涝、易旱问题;二是夯实农业产业基础,完善农业供水保障体系、改造升级灌区骨干工程、完善农田灌排设施、推进水利精准扶贫;三是到2020年,城乡供水一体化达到50%,农村自来水普及率达到80%以上,综合防治水土流失840平方公里,创建600个水生态文明村,强化水源保护水质保障,优化水环境,实现乡村生态宜居;四是发掘传承水利文化,推进乡村水文化建设,保护水利遗产,加强水利风景区建设和水文化宣传普及;五是深化水利管理改革,加强乡村河湖渠塘保护管理,建立水生态保护补偿机制,明晰小型水利工程产权,落实管护主体责任,推进水价改革。

(江西省水利厅宣发中心 万菁)