

不排水条件下的临坡条形基础承载力 有限元极限分析

赵明华¹, 许佳准¹, 张 锐², 肖 尧¹

(1. 湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要:为计算作用在不排水边坡上条形基础的极限承载力, 首先, 根据临坡条形基础承载特性, 将基础假定为刚体且基底与土体之间没有摩擦力, 同时将基础的埋置深度用其两侧的超载代替, 并将其视为平面应变问题, 建立计算模型。然后, 通过有限单元对应力场和速度场进行离散, 根据上、下限定理建立节点应力和节点速度的约束方程, 将外力荷载或总的内能耗散作为目标函数, 建立相应的数学规划模型, 并采用优化算法求解该模型, 得到严格的上、下限解, 在优化计算过程中对 Mohr-Coulomb 准则进行了双曲线近似处理。最后, 在此基础上分析了坡高 H 、基础与坡顶的距离 L 、超载 q 、坡角 β 以及黏聚力 C_u 对极限承载力系数 $p/\gamma B$ 的影响(γ 为重度, B 为坡顶基础宽度, p 为基础承载力)。同时将计算结果与已有成果进行对比分析, 验证了该方法的正确性, 总结了 3 种极限破坏模式, 并提供了常见不排水边坡的设计计算表格, 以供实际工程设计参考。研究表明: $p/\gamma B$ 随 H 的增大先急剧减小, 然后基本稳定, 趋近于一固定值, 临界坡高为 2 倍基础宽度; $p/\gamma B$ 随基础与坡顶的距离增大而增大, 且趋向于一常数; $p/\gamma B$ 随超载的增大而线性增大, 且 L/B 越大, 增长速率越快; $p/\gamma B$ 与坡角基本成线性关系, 其值随着坡角 β 的增大而减小; $p/\gamma B$ 随着黏聚力系数 ($C_u/\gamma B$) 的增大而线性增大。

关键词:道路工程; 有限元; 极限分析; 不排水边坡; 条形基础; 极限承载力

中图分类号: U416.14

文献标志码: A

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.006

Bearing capacity of strip footings on undrained slopes using finite element limit analysis

ZHAO Ming-hua¹, XU Jia-zhun¹, ZHANG Rui², XIAO Yao¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: In order to calculate the bearing capacity of strip footings on undrained slopes, first, according to the bearing characteristics of strip footing on slopes, the footing was assumed to be a smooth rigid body and there was no friction between the base and the soil, the footing buried depth was replaced by overloads on both sides, the problem was considered to be a plane strain problem, and a calculation model was established. Second, the stress field and velocity field was discretized by finite element, and the constraint equations of nodal stress and nodal velocity was established, according to the upper and lower

bound theorems. The total internal energy dissipation or external force load was used as the objective function, a mathematical programming model was established and an appropriate algorithm was used to solve the function, and the strict upper and lower solutions were obtained. The hyperbolic approximation of the Mohr-Coulomb criterion was processed during the optimization calculation. At the same time, the results of this paper were compared with the existing results, the correctness of the method was verified. Three types of failure mechanics were summarized, and the design tables for undrained slopes were presented to provide reference for engineering practice. Finally, based on the numerical results, the effects of slope height H , the distance between the foundation and the top of the slope L , overload q , slope angle β , and cohesion C_u on the bearing capacity factor $p/\gamma B$ were evaluated. Where γ was unit of weight, B was the width of slope top foundation, p was bearing capacity of foundation. The results show that $p/\gamma B$ increases with an increase in H sharply and eventually approaches a constant, the critical slope height is two times that of the footing width. $p/\gamma B$ increases with an increase in L/B and eventually approaches a constant. $p/\gamma B$ increases linearly with overload q and the larger the L/B , the faster is the growth rate. The relationship between $p/\gamma B$ and slope angle β is linear, and it decreases with an increase in the slope angle β . $p/\gamma B$ is linear with the cohesion $C_u/\gamma B$, and it increases with the increase in cohesion $C_u/\gamma B$. 1 tab, 13 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; finite element; limit analysis; undrained slope; strip footing; ultimate bearing capacity

0 引言

临坡地基承载力的计算涉及到工程的安全性与经济性,其研究具有重要的工程应用价值。目前,对临坡地基极限承载力问题的研究大致由两部分组成,一部分是传统理论研究,另一部分是数值方法研究。传统理论研究方面的主要思想是先假定破坏模型,然后再采用滑移线场法、极限平衡法以及极限分析法进行求解。如 Bowlse 计算方法^[1]和 Meyerhof 极限平衡分析法^[2]。Graham 等利用滑移线场法对条形基础作用在无黏性土边坡上的承载力问题进行了研究^[3]。杨峰等在考虑单侧破坏模式的基础上得到了临坡地基承载力上限解^[4]。王志斌等通过试验找出了斜坡地基上高填方路堤滑动破坏面并确定了其承载力^[5]。尉学勇等基于斜坡双侧破坏模式得出了极限分析的上限解^[6]。胡卫东等构建了非对称双侧破坏模式,对临坡地基承载力进行了深入的研究^[7-9]。马庆宏等通过试验对无黏性土斜坡地基极限承载力及其破坏模式的影响因素进行了研究^[10]。在数值分析方面,Ip 利用 PLAXIS 3D 有限元软件对临坡地基极限破坏进行了模拟^[11]。姜鹏明等在上、下限定理的基础上建立计算模型,求解出边坡极限承载力的严密解^[12]。王红雨等利用 FLAC3D 有限差分软件,采用多滑块破坏机构给出了基坑附近的地基承载力系数^[13]。许锡昌等结合室内模型试

验和数值模拟,得到了临坡距离对斜坡地基附加应力的影响^[14]。赵明华等基于上限有限元方法,得到了临坡地基承载力黏聚力影响系数 N_c 、超载影响系数 N_q 、重力影响系数 N_γ ^[15]。尹鑫等采用基于极限分析上限法的数值模拟技术,对在地震荷载作用下土边坡的承载力进行了研究并绘制了承载力系数图^[16]。Zhou 等利用不连续布局优化(DLO)数值模拟技术,对临坡条形基础的承载力进行了分析,并总结了破坏模式^[17]。

以上研究都是针对在排水条件下的土质边坡,由于降雨的影响,临坡地基的承载力将相应减少,此时考虑不排水情况将偏于安全。本文将采用有限元极限分析方法对不排水临坡条形基础承载力问题进行系统研究。该方法是国际上最近发展起来的一种数值方法,与传统极限分析法和有限元方法相比,其优势在于:①不需要人为构造许可静应力场(下限解)及机动许可的运动场(上限解);②将直接给出极限承载力的下限和上限,不需要通过荷载-位移曲线来确定极限承载力,有效克服了读数误差;③结果容易收敛,计算效率较高。

本文首先对有限元极限分析基本原理作简要介绍;然后详细讨论坡高,超载,坡角等因素对极限承载力的影响;最后,对不排水边坡上临坡条形基础极限破坏模式进行分析,并给出了不排水边坡上临坡基础的设计建议,以期同类工程实践提供参考。

1 计算原理与方法

本文采用有限元上、下限分析方法研究不排水条件下的临坡条形基础承载力问题,该方法主要思想为:根据极限分析基本理论,结合有限元的方法,利用计算机求解得到严格的上、下限解。下文将简单介绍其基本原理和计算程序求解过程。

1.1 单元离散

如图1所示,对计算域采用三角形单元进行离散,其中,每个下限单元有3个节点,每个节点*i*上有3个未知应力分量(σ_{xi} , σ_{yi} , τ_{xyi}),每个单元内共2个未知体积力分量(h_x , h_y),其中 σ_{xi} 、 σ_{yi} 为*x*、*y* 方向的正应力, τ_{xyi} 为剪应力, h_x 、 h_y 为*x*、*y* 方向上的体积力;每个上限单元同样也有3个节点,每个节点*j*上有2个未知速度分量(u_j , v_j),每个单元内共3个未知应力分量 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} ,其中 u_j 、 v_j 分别为*x*与*y*方向的单元节点速度。

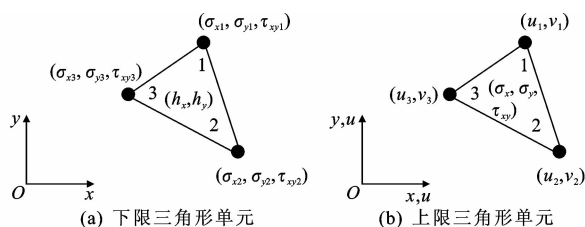


图1 三角形单元示意

Fig.1 Sketch of triangular element

1.2 屈服函数方程

本文是针对土质边坡的极限破坏进行分析,所以采用双曲线形近似 Mohr-Coulomb 屈服准则^[18],选择该近似准则可以避免平面问题中 Mohr-Coulomb 准则在子午平面内存在尖点的问题,双曲线形近似 Mohr-Coulomb 准则函数 $f(x)$ 具体形式如下

$$f(x) = \sigma_m \sin(\varphi) + \sqrt{\sigma^2 + \alpha^2 \sin^2(\varphi)} - C_u \cos(\varphi) \quad (1)$$

其中

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}(s_x^2 + s_y^2) + \tau_{xy}^2}, s_x = \sigma_x - \sigma_m, s_y = \sigma_y - \sigma_m$$

$$\alpha = 0.05 C_u \cot(\varphi)$$

式中: φ 为内摩擦角。

1.3 非线性规划模型的建立

单元离散后,根据上、下限定理,建立节点应力和节点速度的约束方程,以总的内能耗散或外力荷载作为目标函数,并得到相应的数学规划模型。

上限分析数学规划模型 $\min Q$ 具体形式为^[19]

$$\min Q = \sigma^T B u - c^T u \quad (2)$$

$$A u = b \quad (3)$$

$$B u = \sum_{j=1}^E \lambda_j \nabla f_j(\sigma) \quad (4)$$

$$\lambda_j f_j(\sigma) = 0 \quad j \in J_\sigma \quad (5)$$

$$f_j(\sigma) \leq 0 \quad j \in J_\sigma \quad (6)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j \in J_\sigma \quad (7)$$

式中: u 为全局节点速度列向量; σ 为全局应力列向量; B 为全局相容性矩阵; c 为全局已知外荷载系数列向量; A 为线性约束方程系数矩阵, b 为相应的方程组右端项; $f_j(\sigma)$ 为塑性屈服函数约束; λ_j 为与 $f_j(\sigma)$ 对应的塑性乘子率; E 为总单元数; J_σ 为所有应力屈服函数的集合。

下限分析数学规划模型 $\max Q$ 具体形式为^[20]

$$\max Q = c^T x \quad (8)$$

$$A x = b \quad (9)$$

$$f_j(x) \leq 0 \quad j \in J_\sigma \quad (10)$$

$$x \in R^n \quad (11)$$

式中: x 为全局节点应力列向量; $f_j(x)$ 为屈服准则或其他条件产生的不等式约束; R^n 为所有优化变量的集合。

1.4 有限元上、下限分析的计算机实现

有限元上、下限分析的求解过程如图2所示,本文采用 MATLAB 平台编制了相关计算机程序,计算网格的划分,对优化模型建构和求解,并调用 Tecplot 360 软件实现数据信息可视化^[21-22]。

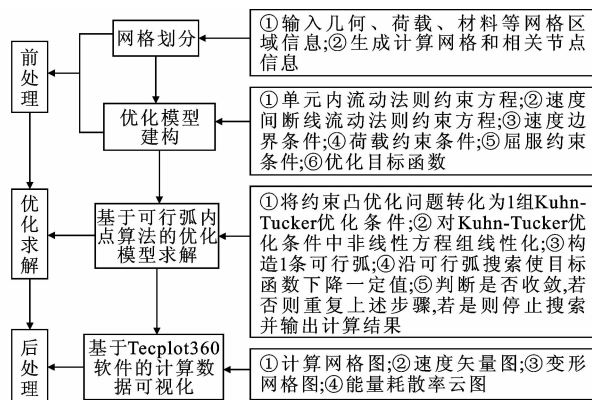


图2 有限元上、下限分析的计算机实现

Fig.2 Computer implementation of upper and low bound finite element method

2 问题描述

2.1 基本假定

本文简化计算模型如图3所示,边坡的高度为 H ,坡度为 β ,坡顶的基础宽度为 B ,基础距坡顶的距离为 L , p 为基础极限承载力, q 为基础两侧超载。

地基土采用服从 Mohr-Coulomb 屈服条件以及正交流动法则的均质理想塑性材料,土体特性参数为黏聚力 C_u 和内摩擦角 φ ,由于假定为不排水条件,所以 $\varphi=0$,重度为 γ 。同时做出如下假定:

(1)边坡坡面水平,条形基础作用在坡顶顶面,可视为平面应变问题;

(2)基础为完全刚性体且其底面光滑;

(3)不考虑基础底面以上土体的抗剪强度,用基础两侧的超载代替其埋置深度。

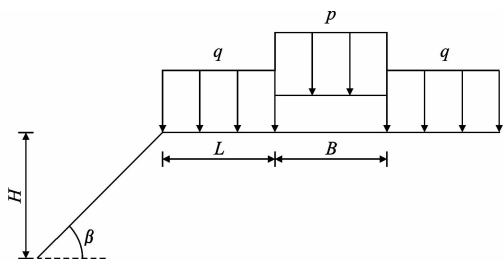


图3 计算模型示意

Fig. 3 Sketch of calculation model

2.2 数值模型

为了减小边界条件对结果的影响,数值计算模型宽取 $45B$,高随 H 的变化而变化。模型底部采用完全约束条件(法向位移和水平位移均为0),模型左右边界采用法向约束条件(法向位移为0)。本文的结果是上限和下限的平均值,为提高计算精度和效率,采用网格自适应划分技术^[23],单元总数为12 000个,网格划分效果如图4所示(此时 $\beta=45^\circ$, $H/B=2$, $L/B=0$)。

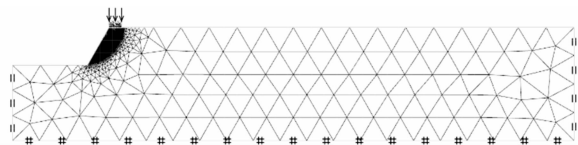


图4 数值模型及网格划分

Fig. 4 Numerical model and mesh

2.3 评价指标

为了对该问题进行更好地分析,引入了一个承载力表示方法,同时对其进行了量纲一化处理以便于工程应用,其表达式 $f(\cdot)$ 为

$$\frac{p}{\gamma B} = f\left(\beta, \frac{L}{B}, \frac{C_u}{\gamma B}, \frac{q}{\gamma B}, \frac{H}{B}, \varphi\right) \quad (12)$$

式中: $\frac{p}{\gamma B}$ 、 $\frac{L}{B}$ 、 $\frac{C_u}{\gamma B}$ 、 $\frac{q}{\gamma B}$ 、 $\frac{H}{B}$ 分别为基础的承载力、基础与坡顶距离、黏聚力、超载、坡高的量纲一化参数。

由于本文考虑的是不排水情况,故内摩擦角为0。

3 计算结果与讨论

3.1 边坡高度的影响

图5给出了坡角 β 为 30° 、 45° 、 60° 和 75° 时, H/B 与承载力系数 $p/\gamma B$ 的关系曲线。其他参数取值保持不变, $L/B=0$, $q/\gamma B=0$ 。

由图5可知, $p/\gamma B$ 随 H/B 的增大先急剧减小,然后基本稳定,趋近于一固定值,该固定值的大小与 C_u 和坡角 β 有关。也就是说,当边坡高度达到一定高度后,增加边坡高度不影响极限承载力的大小。本文中临界 $H/B=2$,且临界 H/B 与坡角 β 无关。

3.2 基础与坡顶距离的影响

图6给出了在不同坡角条件下, L/B 与承载力系数 $p/\gamma B$ 的关系曲线。其他参数取值保持不变, $C_u/\gamma B=3$, $q/\gamma B=0$, $H/B=2$ 。

由图6可知, $p/\gamma B$ 随着 L/B 的增大而增大,但其增长率越来越小,最后趋近于一固定值,该值与坡角 β 无关,但坡角 β 越大,临界 L/B 越大。

3.3 超载的影响

图7给出了不同 L/B 条件下,超载系数 $q/\gamma B$ 与承载力系数 $p/\gamma B$ 的关系曲线。其他参数取值保持不变, $C_u/\gamma B=3$, $H/B=2$, $\beta=45^\circ$ 。

由图7可知:在 L/B 为 $0\sim 2$ 时,超载系数 $q/\gamma B$ 对承载力系数 $p/\gamma B$ 几乎没有影响;当 $L/B>2$ 时,承载力系数 $p/\gamma B$ 随着超载系数 $q/\gamma B$ 的增大而增大,且其增大速率越来越大,直到 $L/B=4$ 时,承载力系数 $p/\gamma B$ 随超载系数 $q/\gamma B$ 增大的速率趋于稳定。

3.4 坡角的影响

图8给出了不同 $C_u/\gamma B$ 条件下,坡角 β 与承载力系数 $p/\gamma B$ 的关系曲线。其他参数取值保持不变, $H/B=2$, $L/B=0$, $q/\gamma B=0$ 。由图8可知,承载力系数 $p/\gamma B$ 与坡角 β 基本呈线性, $p/\gamma B$ 随着 β 的增大而减小。

3.5 黏聚力的影响

图9给出了不同坡角条件下,土的黏聚力系数 $C_u/\gamma B$ 与承载力系数 $p/\gamma B$ 的关系曲线。其他参数取值保持不变, $L/B=0$, $q/\gamma B=0$, $H/B=0$ 。

由图9可知,承载力系数 $p/\gamma B$ 与黏聚力系数 $C_u/\gamma B$ 基本上也呈线性, $p/\gamma B$ 随着 $C_u/\gamma B$ 的增大而增大。

4 极限破坏模式

保持 $C_u/\gamma B=3$, $q/\gamma B=0$, $\beta=45^\circ$ 不变, $H/B=2$

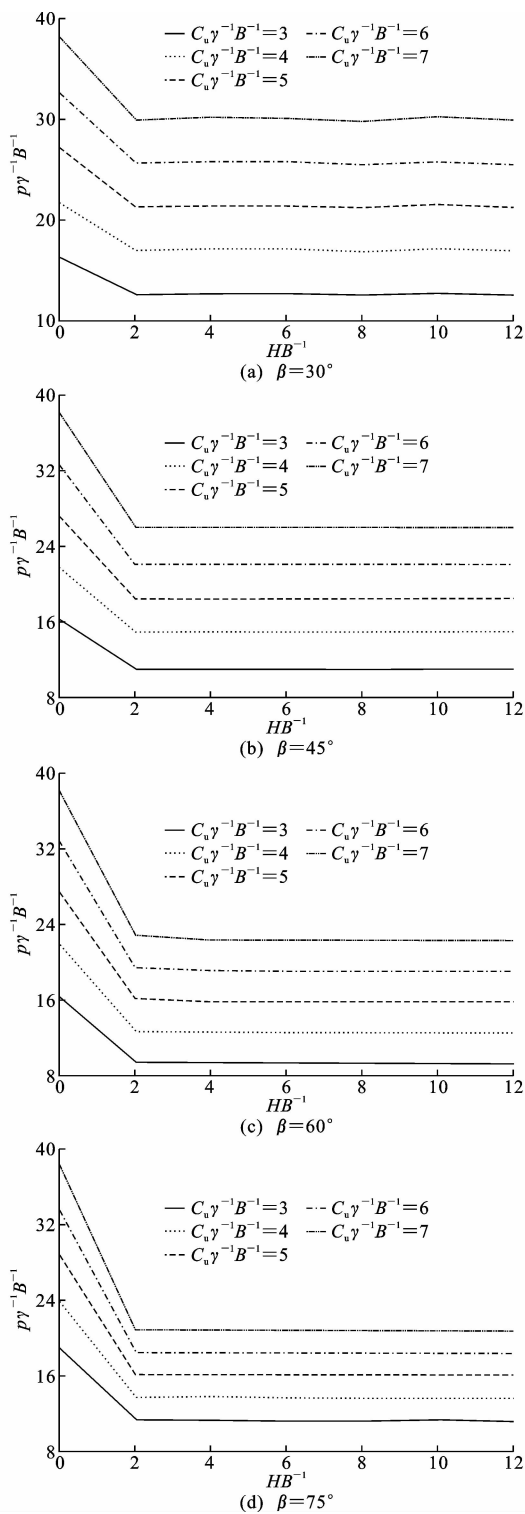


图 5 HB^{-1} 对 $p\gamma^{-1}B^{-1}$ 的影响
Fig. 5 Effects of HB^{-1} on $p\gamma^{-1}B^{-1}$

时,不同临坡距离 L/B 的极限破坏模式和在 $L/B=2$ 时,不同坡高 H/B 的极限破坏模式,分别如图 10、11 所示。

根据图 12 可以得出 3 种破坏模式:当 $L/B=0$ 时,边坡的破裂面由基础底面直接延伸到坡面,即破

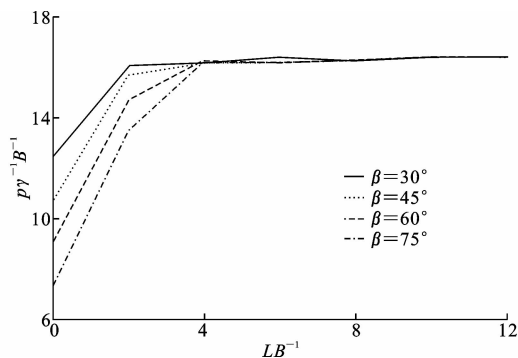


图 6 LB^{-1} 对 $p\gamma^{-1}B^{-1}$ 的影响
Fig. 6 Effects of LB^{-1} on $p\gamma^{-1}B^{-1}$

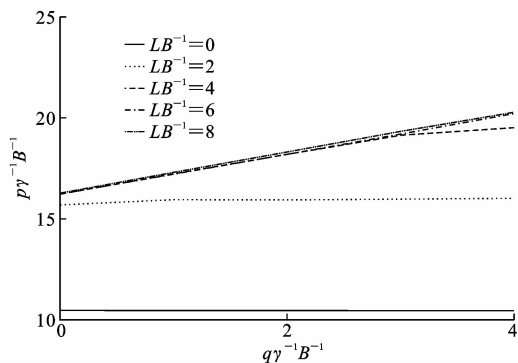


图 7 $q\gamma^{-1}B^{-1}$ 对 $p\gamma^{-1}B^{-1}$ 的影响
Fig. 7 Effects of $q\gamma^{-1}B^{-1}$ on $p\gamma^{-1}B^{-1}$

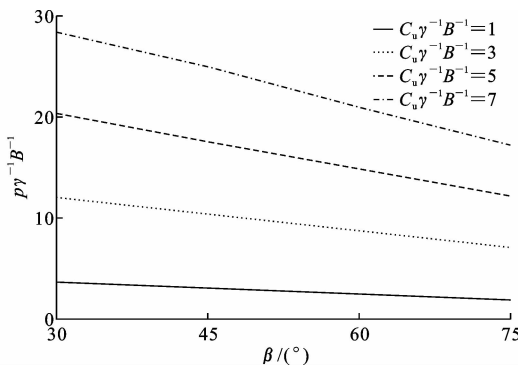


图 8 β 对 $p\gamma^{-1}B^{-1}$ 的影响
Fig. 8 Effects of β on $p\gamma^{-1}B^{-1}$

坏模式 I ;随着基础距坡顶的距离增加,也就是当 L/B 大于 0 时,地基的破坏模式开始变得复杂,可以分为 3 个部分,分别是基础底部的主动区 C,基础外侧至坡面的被动区 A 以及其过渡区 B,即破坏模式 II ;当基础距坡顶的距离进一步增加,也就是当 $L/B>4$ 时,地基的破坏形式与基础作用在水平地面时的破坏形式一致,即破坏模式 III,边坡对地基的破坏模式没有影响。

5 工程设计建议

为了更好地满足实际工程需求,将常见不排水

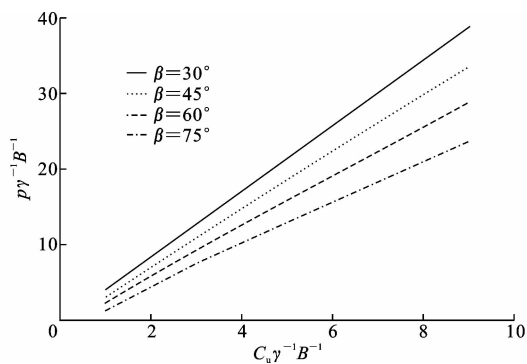


图 9 $C_u/\gamma B^{-1}$ 对 $p\gamma^{-1}B^{-1}$ 的影响
Fig. 9 Effect of $C_u\gamma^{-1}B^{-1}$ on $p\gamma^{-1}B^{-1}$

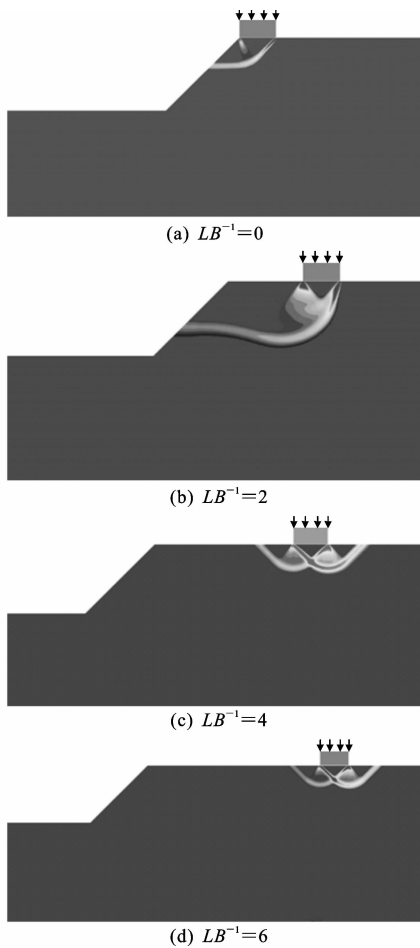


图 10 不同 LB^{-1} 条件下的极限破坏模式($HB^{-1}=2$)
Fig. 10 Failure patterns with different LB^{-1} ($HB^{-1}=2$)

边坡的计算结果总结在表 1 中。计算时, H/B 取 2, 超载 $q=0$ 。通过各参数对承载力系数 $p/\gamma B$ 的影响分析可知, 临界坡高为 $H/B=2$ 时, 超载能在一定范围内提高条形基础的承载力, 这些是对工程有利的因素。

6 结果对比与验证

文献[23]中采用有限元上下限法对不排水临坡

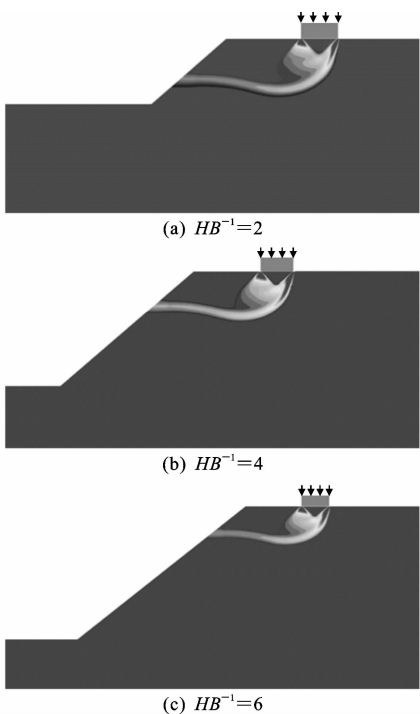


图 11 不同 HB^{-1} 条件下的极限破坏模式($LB^{-1}=2$)
Fig. 11 Failure patterns with different HB^{-1} ($LB^{-1}=2$)

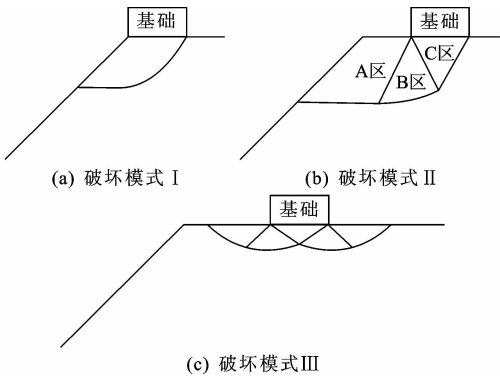


图 12 三种极限破坏模式
Fig. 12 There types of failure patterns

地基承载力进行了计算, 该方法已获得国际同行认可, 因此, 为了验证本文方法的正确性, 将本文的计算结果与文献[23]的结果进行对比, 计算参数 $H/B=3$, $C_u/\gamma B=1$, $q/\gamma B=0$, 对比结果如图 13 所示。由图 13 可知, 本文结果与文献[23]结果的误差较小, 证明了本文方法的正确性。

7 结 语

(1) 本文根据极限分析上、下限基本原理, 利用 MATLAB 平台编制有限元极限分析计算程序, 得到了作用在不排水边坡条形基础的极限承载力, 并对计算结果进行了量纲一化处理, 以便于工程应用, 该方法较好地结合有限元的优点, 能规避人为构造

表 1 条形基础作用在不排水边坡上承载力系数 $p\gamma^{-1}B^{-1}$

Tab. 1 Bearing capacity coefficients $p\gamma^{-1}B^{-1}$ for strip footing on undrained slopes

$C_u\gamma^{-1}B^{-1}$	$\beta/(^{\circ})$	LB^{-1}					
		0	2	4	6	8	10
1	30	3.96	5.25	5.40	5.45	5.42	5.46
	45	3.28	4.71	5.40	5.40	5.42	5.46
	60	2.61	4.13	5.25	5.40	5.42	5.46
	75	1.99	3.58	5.01	5.40	5.41	5.46
2	30	8.23	10.72	10.80	10.91	10.84	10.91
	45	7.10	10.33	10.80	10.80	10.84	10.91
	60	5.91	9.50	10.83	10.80	10.84	10.91
	75	4.77	8.62	10.69	10.80	10.83	10.91
3	30	12.47	16.09	16.20	16.37	16.26	16.37
	45	10.85	15.69	16.20	16.20	16.26	16.37
	60	9.13	14.71	16.24	16.19	16.26	16.37
	75	7.44	13.52	16.20	16.20	16.24	16.37
4	30	16.72	21.46	21.60	21.82	21.67	21.75
	45	14.60	21.03	21.60	21.59	21.67	21.82
	60	12.34	19.86	21.65	21.59	21.67	21.75
	75	10.10	18.38	21.64	21.59	21.65	21.82
5	30	20.96	26.83	26.99	27.27	27.09	27.28
	45	18.34	26.35	27.02	26.99	27.09	27.28
	60	15.54	25.00	27.06	26.91	27.09	27.28
	75	12.78	23.23	27.06	26.99	27.06	27.28

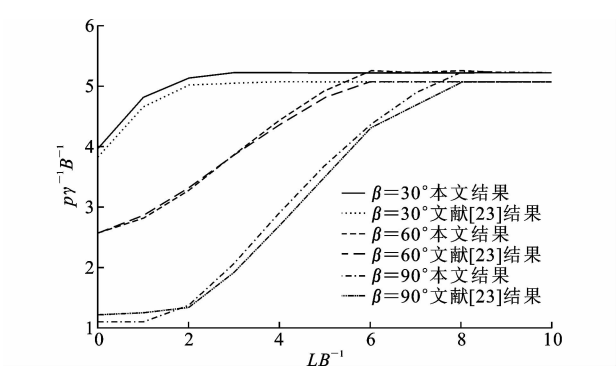


图 13 本文与文献[23]结果比较

Fig. 13 Results comparisons of this paper with reference [23]

机动场带来的误差。

(2)通过对计算结果的分析可知,承载力系数 $p/\gamma B$ 随着 H 的增加先减小,然后趋向于一定值,临界坡高为 2 倍基础宽度; L/B 越大,承载力系数 $p/\gamma B$ 越高,也会趋向于一定值;当 $L/B>2$ 时,承载力系数 $p/\gamma B$ 随着超载的增大而增大;坡角 β 和黏聚力 C_u 与承载力系数 $p/\gamma B$ 大致呈线性。

(3)计算了一般情况下条形基础作用在不排水边坡上的承载力系数并制表,该表能满足大部分工程设计的要求,同时还总结了 3 种破坏模式,供工程

实际参考。

(4)本文将边坡视为平面应变问题,忽略了空间效应对边坡的影响,因此,空间效应对边坡的影响需进一步研究。

参考文献:

References:

[1] BOWLES L E. Foundation analysis and design[M]. Bothell:McGraw-Hill Publishing Company,2001.

[2] MEYERHOF G. The ultimate bearing capacity of foundations on slope [M]. Geotechnique, 1951, 2 (4): 301-332.

[3] GRAHAM J, ANDREWS M, SHIELDS D H. Stress characteristics for shallow footings in cohesionless slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25 (2):238-249.

[4] 杨 峰,阳军生,张学民,等. 斜坡地基单侧滑移破坏模式及承载力上限解[J]. 工程力学,2010,27(6): 162-168.

YANG Feng, YANG Jun-sheng, ZHANG Xue-min, et al. One-side slip failure mechanism and upper bound solution for bearing capacity of foundation on slope [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (6): 162-168.

[5] 王志斌,李 亮,杨晓礼. 极限分析上限法在山区斜坡地基上高填方路堤极限承载力研究中的应用[J]. 塑性工程学报,2007,14(2):118-122.

WANG Zhi-bin, LI Liang, YANG Xiao-li. Application of upper-bound theorem of limit analysis to ultimate capacity of embankments on mountain slope foundation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14 (2):118-122.

[6] 尉学勇,王晓谋,怀 超. 斜坡地基极限承载力上限解计算与分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(3): 381-387.

YU Xue-yong, WANG Xiao-mou, HUAI Chao. Calculation and analysis of upper limit solution of ultimate bearing capacity of slope ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3):381-387.

[7] 胡卫东,曹文贵. 基于非对称破坏模式的临坡地基承载力上限极限分析方法[J]. 中国公路学报,2014,27(6):1-9.

HU Wei-dong, CAO Wen-gui. Upper limit analysis method for ultimate bearing capacity of ground foundation adjacent to slope based on asymmetry failure mode[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6):1-9.

[8] 胡卫东,曹文贵. 基于双侧非对称破坏模式的临坡地

- 基承载力极限平衡分析方法[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 120-128.
- HU Wei-dong, CAO Wen-gui. The limit equilibrium method for ultimate bearing capacity of ground foundation adjacent to slope based on bilateral asymmetry failure mode[J]. China Civil Engineer Journal, 2015, 48(1): 120-128.
- [9] 胡卫东, 曹文贵, 袁青松. 基于非对称双侧破坏模式的临坡地基承载力上限分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2787-2794.
- HU Wei-dong, CAO Wen-gui, YUAN Qing-song. An upper-bound limit analysis of ultimate bearing capacity of ground foundation adjacent to slope based on asymmetric and bilateral failure mode[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2787-2794.
- [10] 马庆宏, 朱大勇, 雷先顺, 等. 无黏性土斜坡地基承载力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1271-1280.
- MA Qing-hong, ZHU Da-yong, LEI Xian-shun, et al. Model tests on bearing capacity of footing on sand slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1271-1280.
- [11] IP K W. Bearing capacity for foundation near slope [D]. Montreal: Concordia University, 2005.
- [12] 姜鹏明, 盛 欢, 陆长锋, 等. 边坡极限承载力的严密解[J]. 工程力学, 2009, 26(增 1): 77-80.
- JIANG Peng-ming, SHENG Huan, LU Chang-feng, et al. Rigorous solution of the slope ultimate bearing capacity[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S1): 77-80.
- [13] 王红雨, 杨 敏. 临近基坑条形基础地基承载力简化上限解[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 319-324.
- WANG Hong-yu, YANG Min. Approximate upper-bound solution for bearing capacity of strip footings near excavations[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(3): 319-324.
- [14] 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(增 2): 267-273.
- XU Xi-chang, CHEN Shan-xiong, JIANG Ling-fa. Experimental study and numerical simulation on additional stress distribution of foundation adjacent to slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 267-273.
- [15] 赵明华, 胡 啸, 张 锐. 临坡地基承载力极限分析上限有限元数值模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1137-1143, 1152.
- ZHAO Ming-hua, HU Xiao, ZHANG Rui. Numerical simulation of the bearing capacity of a foundation near slope using the upper bound finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1137-1143, 1152.
- [16] 尹 鑫, 周海祚, 郑 刚. 地震作用下临近边坡的条形基础极限承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增 2): 95-98.
- YIN Xin, ZHOU Hai-zuo, ZHENG Gang. Seismic bearing capacity of strip footings adjacent to slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 95-98.
- [17] ZHOU Hai-zuo, ZHENG Gang, YIN Xin, et al. The bearing capacity and failure mechanism of a vertically load strip footing placed on the top of slopes [J]. Computers and Structures, 2018, 94: 12-21.
- [18] ABBO A J, SLOAN S W. A smooth hyperbolic approximation to the Mohr-Coulomb yield criterion[J]. Computers and Structures, 1995, 54(3): 427-441.
- [19] LYAMIN A V, SLOAN S W. Upper bound limit analysis using linear finite elements and non-linear programming[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(2): 181-216.
- [20] LYAMIN A V, SLOAN S W, KRABBENHOFT K, et al. Lower bound limit analysis with adaptive remeshing [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(14): 1961-1974.
- [21] 赵明华, 张 锐, 刘 猛, 等. 下限分析有限单元法的非线性规划求解 [J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3589-3597.
- ZHAO Ming-hua, ZHANG Rui, LIU Meng, et al. Nonlinear programming of lower bound finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3589-3597.
- [22] 赵明华, 张 锐. 有限元上限分析网格自适应方法及其工程应用 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 537-545.
- ZHAO Ming-hua, ZHANG Rui. Adaptive mesh refinement of upper bound finite element method and its applications in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 537-545.
- [23] SHIAU J S, MERIFIELD R S, LYAMIN A V, et al. Undrained stability of footings on slopes [J]. International Journal of Geomechanics, 2011, 11(5): 381-390.