

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0257

临近边坡的条形基础地基极限承载力数值分析

郑刚^{1,2,3}, 于晓旋^{1,2}, 杜娟^{4,1}, 尹鑫^{1,2}, 周海祚^{1,2,3}, 杨新煜^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 4. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘 要: 建筑物或构筑物基础临近边坡放置的情况在实际工程中十分普遍, 但目前对于临近边坡基础的地基承载力及破坏模式尚缺乏深入研究。采用不连续布局优化(DLO)极限分析法建立数值模型, 分析边坡几何尺寸、土体参数和基础位置对临坡条形基础的极限承载力和边坡破坏模式的影响, 并对国内外现行规范推荐的计算方法进行评价。结果表明: 极限承载力随边坡高度和边坡倾斜角的增大而减小, 当坡高超过临界高度后, 极限承载力将不受其影响; 极限承载力随土体黏聚力和内摩擦角的增大而提高, 滑动面随黏聚力的增大而变浅, 随内摩擦角的增大而变深; 极限承载力随基础与坡肩相对距离的增大而提高, 当基础置放位置超过某临界距离后极限承载力不受边坡影响。在土体强度高、坡角较大时, 《建筑地基基础设计规范》规定的临坡基础最小置放距离偏于危险, 设计时仍需考虑边坡对承载力的减损作用; 在土体强度较低、坡角较小时, 规范规定值偏于保守。美国 AASHTO 规范对边坡地基极限承载力的取值在砂土边坡时较为可靠, 但其仅适用于坡面破坏模式的情况; 饱和黏土边坡的承载力曲线有悖于理论解, 对临界距离的规定同样存在低估。

关 键 词: 临近基坑; 承载力; 破坏模式; 边坡稳定; 安全距离

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 10-3812-10

Numerical analysis of ultimate bearing capacity of strip footings near slopes

ZHENG Gang^{1,2,3}, YU Xiao-xuan^{1,2}, DU Juan^{4,1}, YIN Xin^{1,2}, ZHOU Hai-zuo^{1,2,3}, YANG Xin-yu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
4. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: The footing placed on the top of a slope is common in geotechnical engineering practice. However, few studies were performed to study the bearing capacity and the failure mechanism of footing-slope systems. In this study, discontinuity layout optimization (DLO) is adopted to study the effects of geometry of the slope, soil properties and footing location on the limit load and the critical collapse mechanism. Evaluations are provided concerning the recommended estimating methods in present codes both at home and abroad. The results show that the ultimate bearing capacity decreases as the increasing slope height and slope angle, but the effects can be neglected when the slope height exceeds a critical value; the ultimate bearing capacity increases as the increasing soil strength. The failure slip becomes shallower with high soil cohesion, while the failure slip develops deeper with the increase of friction angle. The bearing capacity increases with the normalized footing distance of from the crest of slopes, and there is a critical normalized distance that makes the effect of slopes can be negligible. The specified value for the minimum distance suggested by the China Code for design of building footing is smaller than the critical distance with high soil strength and large slope angles, and the effect of slopes on the bearing capacity should be considered; conversely, the recommended designed distance tends to be conservative for low soil strength and small slope angles. In AASHTO code, the ultimate bearing capacity values for cohesiveless soil are reliable, but only face failure mode is considered; the recommended design chart is contrary to theoretical solution in cohesive soil. The normalized footing distance from the crest of slopes is underestimated in AASHTO code.

Keywords: near excavation; bearing capacity; failure modes; slope stability; safe distance

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家重点研发计划(No.2017YFC0805407); 国家自然科学基金(No. 51708405, No. 41630641); 天津市科技计划支撑计划项目(No. 16YDLJSF00040)。This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0805407), the National Natural Science Foundation of China (51708405, 41630641) and the Project of Tianjin Science and Technology Plan (16YDLJSF00040).

第一作者简介: 郑刚, 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学及岩土工程的教学与科研工作。E-mail: zhenggang1967@163.com
通讯作者: 杜娟, 女, 1978年生, 博士研究生, 副教授, 主要从事土力学、地基处理等方面的研究与教学工作。E-mail: dujuan2012@hainu.edu.cn

1 引 言

在建筑、铁路、公路等工程实践中, 由于地形条件的限制及工程需要, 常常需要将挡土墙、输电塔和桥墩等结构的基础置放在斜坡地基上或者是临近斜坡坡肩的位置^[1-2]。另外, 随着城市发展, 城区土地资源紧缺, 不可避免地需要在已有建筑基础附近进行基坑开挖, 从而引起地层变形和建筑物地基承载力减损, 因此, 临坡地基问题的研究具有重要意义。

临坡地基的地基承载力或建筑物附近基坑开挖导致的承载力减损问题的研究涉及到地基承载力和边坡稳定两大经典土力学问题。Prandtl^[3]假定条形基础置于地基表面 ($d=0$), 地基土无重量 ($\gamma=0$) 且基础底面光滑无摩擦, 根据塑性力学理论求得了基础下形成连续塑性区并处于极限平衡状态时的地基滑动面形态图, 如图 1 所示。

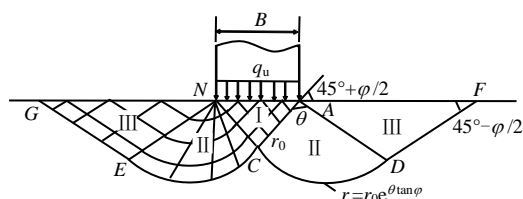


图 1 Prandtl 地基滑动面形态图

Fig.1 Prandtl's foundation sliding surface

地基的极限平衡区可分为 3 个: 基底下的朗肯主动状态区 (I 区)、基础外侧的朗肯被动状态区 (III 区) 以及 I 区与 III 区之间的过渡区 (II 区)。地基极限承载力理论公式为

$$q_u = cN_c \quad (1)$$

$$N_c = \left[e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \right] \cot \varphi \quad (2)$$

在 Prandtl^[3]的基础上, Terzaghi^[4]提出了条形浅基础在有重度情况下中心竖向地基极限承载力公式为

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{\gamma b}{2} N_\gamma \quad (3)$$

式中: q_u 为极限承载力; c 为基础下土体的黏聚力; φ 为土体内摩擦角; q 为基础两侧超载; γ 为基础下土体的重度; b 为基础宽度; N_c 、 N_q 、 N_γ 分别为与黏聚力、超载、重度有关的承载力系数。

Meyerhof^[5]采用极限平衡法分别推导了饱和黏土和砂土边坡上条形基础的地基极限承载力。此后, 王红雨^[6-7]、杨峰^[8]等提出了临近边坡基础的地基承

载力上限解; Graham 等^[9]采用滑移线理论计算了临坡基础的极限承载力; 尉学勇等^[1]推导了能考虑坡顶地面坡度影响的上限解公式; Baligh 等^[10]分析了考虑三维破坏时临坡基础的极限承载力变化规律; Baligh^[11]、Azzouz^[12]等在文献[10]的基础上提出了考虑不同长度矩形荷载的极限承载力计算方法; Michalowski^[13-14]给出了考虑端部效应的机动许可破坏模式; Buhan 等^[15]提出了转动失稳和冲剪破坏的承载力计算理论; 王红雨等^[7]在此基础上提出了临近基坑矩形浅基础地基承载力极限分析的多滑块组合破坏机构。

极限平衡法和极限分析法存在着一定的局限性: 首先, 解析法需要预先假设滑动面通过边坡坡面; 其次, 以上研究是针对饱和黏土或者砂土边坡的研究。Leshchinsky^[16]认为 c - φ 型土体的极限承载力的研究应引起足够重视。有限元及有限差分法被越来越多地应用于该课题。王红雨等^[17]分别研究了饱和黏土的极限承载力和 c - φ 型土坡的破坏模式。Georgiadis^[18-19]应用有限元法研究了饱和黏土边坡上刚性基础在垂直和倾斜荷载作用下极限承载力。

总体来说, 目前针对各参数对临近边坡基础地基极限承载力和破坏模式的影响缺乏深入的认识。本文利用不连续布局优化 (discontinuity layout optimization, DLO)^[20]方法建立数值模型, 结合破坏模式对刚性条形基础下边坡土体黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、边坡倾角 β 、坡高与基础宽度比 H/B 及基础与坡肩距离系数 λ 对临近边坡基础的地基极限承载力的影响进行研究。在此基础上, 与我国现行国家标准《建筑地基基础设计规范》^[21]推荐的基础至坡肩最小水平距离及美国 AASHTO 规范^[22]的承载力计算表格与临界距离进行对比分析。

2 数值分析模型及验证

2.1 数值分析模型

极限分析法是一种解决复杂岩土问题的严格分析方法, 其视土体为理想弹塑性体, 并服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。与有限元法、有限差分法等传统的数值计算方法相比, DLO^[20]通过自动搜索土体达到临界极限状态时的滑动面, 为直接确定不连续土体的临界破坏面和复杂结构的临界荷载提供了一个高效的计算方法。其临界破坏面的搜索方法如下: 首先建立数值模型 (见图 2(a)), 然后定义离散节点 (见图 2(b)), 通过连接节点, 在模型内部形成多条潜在不连续滑动线 (见图 2(c)), 最后通过严格的数学优化技术来识别获得最精确解答

时的临界滑动破坏面 (见图 2(d))。近年来, Leshchinsky^[16, 23]将 DLO 法应用在 c - φ 型土体的极限承载力研究上, Smith 等^[24-25]将此方法应用在稳定问题计算, 为 DLO 法应用于本文对于临近边坡基础的地基承载力及影响机制的研究提供了应用基础。本文所采用的计算程序 LimitState: GEO^[20]基于 DLO 法确定极限承载力和相应的破坏面。

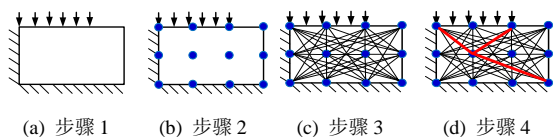


图 2 DLO 法临界破坏面搜索方法示意图

Fig.2 Procedure of DLO to determine critical collapse mechanism

针对条形基础采用平面应变分析, 以 DLO 法建立二维边坡上条形基础分析模型, 如图 3 所示, 刚性条形基础宽度为 B , 基础距坡肩水平距离为 λB , 边坡坡角为 β 。为了消除基础宽度 B 以及地基土重度 γ 对极限承载力的影响, 对地基承载力进行无量纲化处理^[26], 极限承载力 q 的表达式为

$$\frac{q_u}{\gamma B} = f\left(\lambda, \beta, \varphi, \frac{c}{\gamma B}, \frac{H}{B}\right) \quad (4)$$

式中: λ 为基础与坡肩距离系数 (即基础到坡肩距离与基础宽度的比值); β 为边坡坡角; H 为边坡高度。

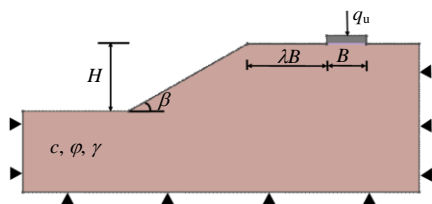


图 3 数值计算模型

Fig.3 Numerical model

计算模型中取土体重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, 基础宽度 $B = 2 \text{ m}$, (由于极限承载力 $q/\gamma B$ 经过无量纲化处理, 地基土重度和基础宽度的取值实际上对结果无影响^[26])。基于 Leshchinsky^[16, 23]研究工况, 本文选取计算参数见表 1, 在参数分析曲线中的转折点及破坏模式变化处附近增加相应计算工况。

为保证计算精度, 本文中计算模型采用 2 000 节点^[16, 23], 并在大尺寸情况下对基础脚点附近及破坏面延伸范围进行局部加密以有效提高计算精度。

2.2 模型验证

本节将采用 DLO 方法计算的承载力系数 N_γ 、

N_c 分别与已有文献进行对比。

表 1 承载力计算参数

参数	本文参数取值
H/B	0.25、0.50、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00、6.00
$\beta/(^\circ)$	10、20、30、40、50、60
$c/B\gamma$	0.0、0.5、1.0、2.0
$\varphi/(^\circ)$	0、10、20、30、40
λ	1、2、3、4、6、8、10

图 4 为 $\varphi = 0^\circ$, $c/B\gamma = 0.5$ 、1.0、2.0 工况下, N_c 随边坡坡角 β 的变化曲线。可见, 承载力系数 N_c 随着坡角 β 的增长呈近似线性减小, β 一定时, N_c 随黏聚力的增长而增大。其中, Georgiadis^[18]和 Leshchinsky^[16]分别采用有限单元法和 DLO 法对边坡地基极限承载力进行计算, 由图 4 可见, 本文的计算结果与有限单元法和 DLO 法的结果吻合较好。

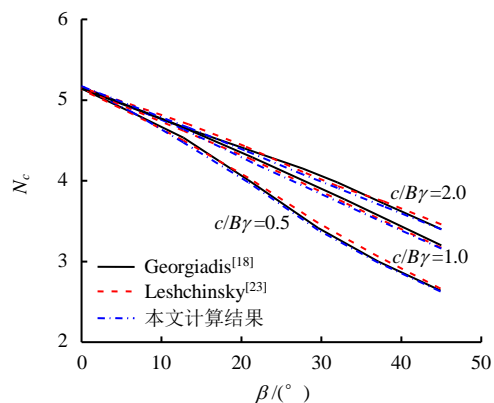


图 4 不同方法的承载力系数 N_c 对比

Fig.4 Comparison of bearing capacity factors N_c by different methods

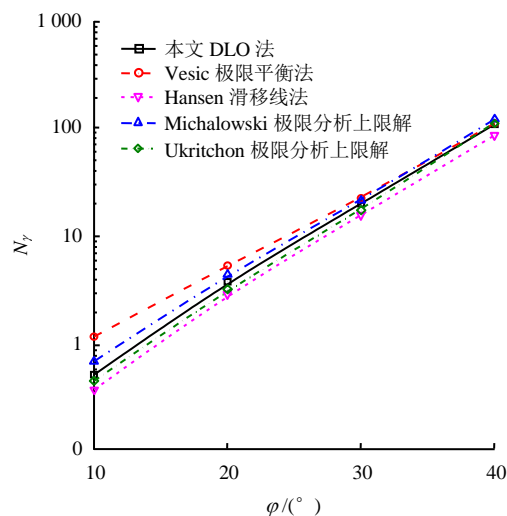


图 5 不同方法的承载力系数 N_γ 对比

Fig.5 Comparison of bearing capacity factors N_γ by different methods

众所周知,承载力系数 N_γ 值受土体内摩擦角的影响显著, N_γ 值的确定是承载力计算的难点。为了进一步验证 DLO 计算的准确性,将 DLO 方法计算的承载力系数 N_γ 分别与 Vesic^[27]的极限平衡法、Hansen 等^[28]的滑移线法、Michalowski^[29]及 Ukritchon 等^[30]的极限分析上限法结果进行对比,如图 5 所示。可见, DLO 方法得出的 N_γ 值低于 Vesic 的极限平衡法解答及 Michalowski 的上限解,与 Ukritchon 的上限解结果较为接近,而略高于 Hansen 解。通过以上对比可见,本文采用的 DLO 方法及计算模型对地基极限承载力的计算具有足够的精度,计算结果可靠。

3 参数分析

本节采用 DLO 极限分析法建立数值模型,对刚性条形基础下边坡土体黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、坡角 β 、坡高系数 H/B 及基础与坡肩距离系数 λ 对临近边坡基础地基极限承载力及边坡破坏模式的影响进行研究。Georgiadis^[19]研究了饱和黏性土坡的坡面破坏、坡趾破坏以及坡体失稳 3 种模式。Leshchinsky^[16]认为 $c-\varphi$ 土坡存在坡面破坏、坡趾破坏和基底破坏 3 种模式。本文在此基础上考虑当基础与坡肩距离较远时滑动面将无法延伸至边坡坡肩处的情况,定义此种破坏模式为普通破坏。本文研究了 $c-\varphi$ 土边坡的坡面破坏、坡趾破坏、基底破坏、坡体失稳破坏和普通破坏对极限承载力的影响,各破坏模式形态如图 6 所示。

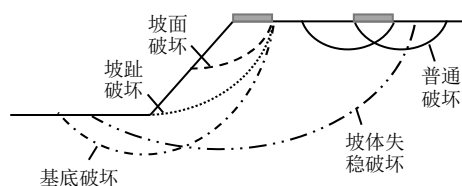


图 6 边坡滑动破坏模式图
Fig.6 Potential failure modes of slope sliding

由于篇幅限制,本节在进行参数分析时仅绘制更能反映破坏模式转变和承载力出现拐点的典型工况。

3.1 H/B 对极限承载力及破坏模式的影响

图 7 为极限承载力 $q/\gamma B$ 随 H/B 的变化规律。由图可见,随 H/B 的增大,地基极限承载力先减小后趋于平稳。当边坡高度超过某一定值后,存在一个临界高度 $(H/B)_c$,当边坡高度小于此高度,随坡高的增加极限承载力显著减小,而当边坡高度大于

该值时,在坡体稳定情况下增加边坡高度对地基极限承载力无影响。此外,随坡角的增大,临界高度增大。

图 8 为图 7 中 $\beta=30^\circ$ 工况下的滑动破坏模式图。当边坡高度较小时,滑动破坏面延伸至边坡坡趾以外区域,发生基底破坏模式(见图 8(a));随着 H/B 增大,发生坡趾破坏(见图 8(b));当边坡高度继续增大,滑动破坏面将达不到坡趾而仅延伸至边坡坡面,发生坡面破坏(见图 8(c));此后,随着边坡的高度的增加,破坏模式不发生改变(见图 8(d)),其所对应的极限承载力恒定。当图中 $H/B=1$ 时,与经典 Prandtl 水平地基上刚性基础的破坏模式类似,基础下存在刚性三角区(即朗肯主动区)、过渡区和朗肯被动区,此时,在边坡底部产生较大范围的朗肯被动区;随着边坡高度增加,朗肯被动区的范围显著减小,对应的承载力大幅降低;当坡高增加至破坏模式转变为坡面破坏,边坡底部朗肯被动区消失,极限承载力趋于稳定。

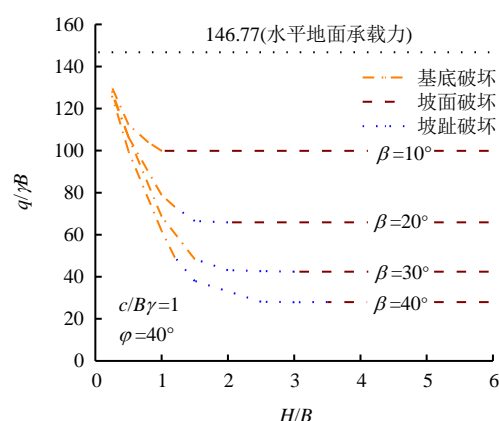


图 7 边坡高度对承载力 $q/\gamma B$ 的影响
Fig.7 Influence of slope height on $q/\gamma B$

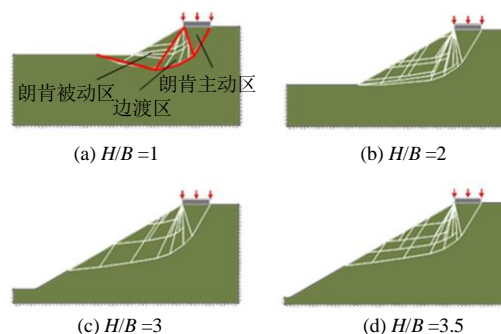


图 8 不同 H/B 时边坡破坏模式图($\varphi=40^\circ, c/\gamma B=1, \beta=30^\circ$)
Fig.8 Failure modes for various values of H/B
($\varphi=40^\circ, c/\gamma B=1, \beta=30^\circ$)

3.2 β 对承载力及破坏模式的影响

图 9 为极限承载力与坡角 β 的关系曲线。由图

可见,当基础底面与坡肩距离较近(如 $\lambda=0、2$)时,极限承载力随着坡角 β 的增大始终减小。当基础底面与坡肩距离较远(如 $\lambda=4、6$)时,在边坡坡度较小时,承载力随 β 的增大而保持不变。无论 λ 的取值如何,极限承载力均在 $\beta=56^\circ$ 时下降为0,可见在土体参数一定时,地基承载力丧失与否与 λ 无关,仅取决于边坡自身几何构造和土体强度。

下面结合不同边坡坡角时地基滑动破坏模式解释上述规律。图10为图9中 $c/\gamma B=0.5$, $\varphi=10^\circ$, $H/B=5$, $\lambda=0$ 工况下不同边坡坡角的破坏模式图。在坡角 β 较小时,边坡自身稳定性较好,发生坡面破坏模式(见图10(a)、10(b));随着坡角 β 的增大,破坏模式将由坡面破坏变为坡趾破坏,(见图10(c));当坡角较大时,边坡稳定性降低,此时滑动破坏面从远离基础的坡顶向下滑移(见图10(d)),此时破坏面中不再具有明显的主动区、扇形过渡区和朗肯被动区,而是边坡破坏时的旋转破坏机制。此时土体的重度不再贡献地基的极限承载力而是导致边坡自身失稳,即图9中承载力迅速减小至0。

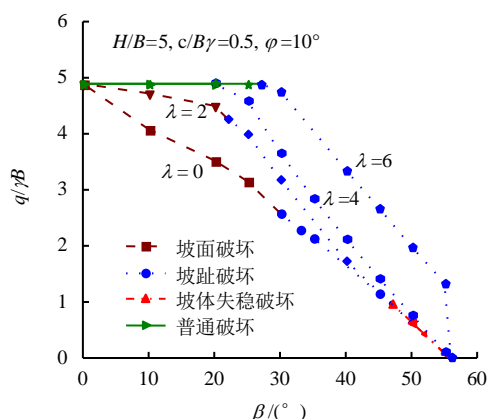


图9 不同 λ 时 β 对承载力 $q/\gamma B$ 的影响

Fig.9 Influence of β on bearing capacity $q/\gamma B$ for various values of λ

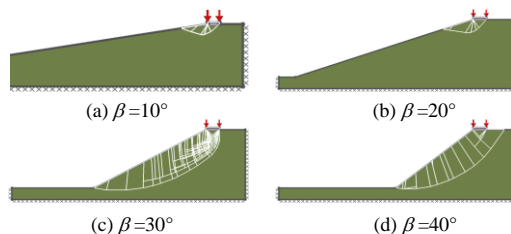


图10 不同 β 时边坡破坏模式图($H/B=5$, $c/\gamma B=0.5$, $\varphi=10^\circ$)

Fig.10 Failure modes for various values of β ($H/B=5$, $c/\gamma B=0.5$, $\varphi=10^\circ$)

3.3 $c/\gamma B$ 对承载力及破坏模式的影响

图11为极限承载力随 $c/\gamma B$ 的变化情况。由图

可见,当黏聚力较小时,边坡将出现坡体失稳破坏,随黏聚力的增大,极限承载力迅速增大,破坏模式经坡趾破坏转变为坡面破坏。此后,滑动破坏模式随黏聚力的增大将保持为坡面破坏,极限承载力近似呈线性增长。由图11可见,保持边坡稳定的黏聚力起始点随土体内摩擦角 φ 的增大而减小。

当土体黏聚力较小时,边坡稳定性较差,出现坡体整体失稳破坏(见图12(a));随黏聚力的增大,边坡稳定性增强,破坏模式经坡趾破坏(见图12(b))变为坡面破坏(见图12(c)、12(d)),滑动破坏面随黏聚力的增大而变浅,当土体黏聚力超过某一限值后将保持不变。

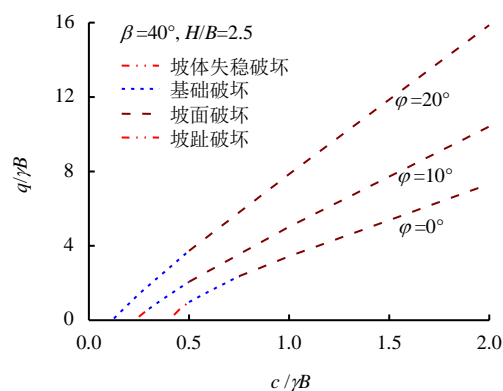


图11 不同 φ 时土体黏聚力对承载力 $q/\gamma B$ 的影响

Fig.11 Influence of soil cohesion on $q/\gamma B$ for various values of φ

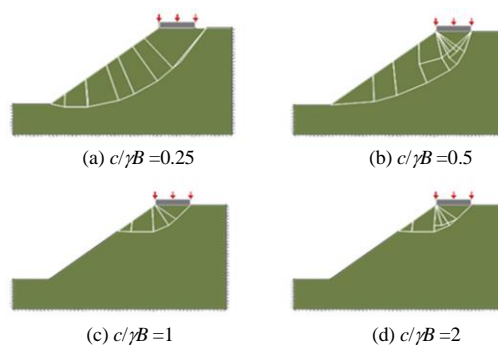


图12 不同土体黏聚力时边坡破坏模式图($H/B=2.5$, $\beta=40^\circ$, $\varphi=10^\circ$)

Fig.12 Failure modes for various values of soil cohesion ($H/B=2.5$, $\beta=40^\circ$, $\varphi=10^\circ$)

3.4 φ 对承载力及破坏模式的影响

图13为极限承载力随内摩擦角的变化情况。极限承载力随 φ 的增大而增大,承载力曲线在 φ 较小时较为平缓,随 φ 的增加承载力提高速率迅速增大。破坏模式由最初的坡趾破坏变为坡面破坏,后经坡趾破坏,最终变为基底破坏,极限承载力显著增大。

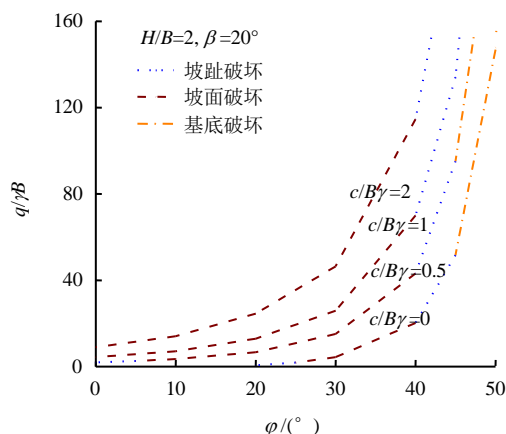


图 13 土体内摩擦角对承载力 $q/\gamma B$ 的影响
Fig.13 Influence of φ on $q/\gamma B$

由图 14 可见,在土体较弱时,发生坡趾破坏(见图 14(a)),此时承载力较小;随着 φ 的增大,边坡稳定性提高,破坏模式变为坡面破坏(见图 14(b));随 φ 的进一步增大,滑动面经坡趾破坏(见图 14(c))并进一步变为基底破坏(见图 14(d))。由破坏模式图可得,滑动面随土体内摩擦角的增大而变深,承载力显著增大。

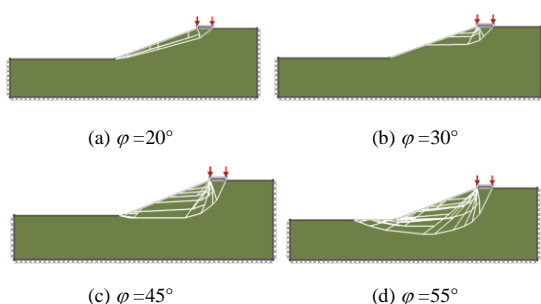


图 14 不同 φ 情况下边坡破坏模式图 ($H/B=2$, $\beta=20^\circ$, $c/\gamma B=0$)

Fig.14 Failure modes for various values of φ
($H/B=2$, $\beta=20^\circ$, $c/\gamma B=0$)

3.5 λ 对承载力及破坏模式的影响

由图 15 可见,极限承载力随着基础与坡肩距离系数 λ 的增大而增大,但存在临界距离 λ_c ,当达到临界距离 λ_c 后,承载力不再随 λ 的增大而改变。其中, λ_c 随 β 的提高而增大。

下面结合图 15 中 $\beta=40^\circ$ 工况下的边坡破坏模式图解释上述现象。由图 16 可见,达到临界距离 λ_c 前(见图 16(a)~16(c)),随基础与坡肩距离的增大,滑动破坏面延伸范围增大,基础下参与剪切破坏的土体体积增加。随置放距离的进一步增大,滑动破坏面将达不到坡肩位置,发生经典的 Prandtl 破坏模式(见图 16(d))。

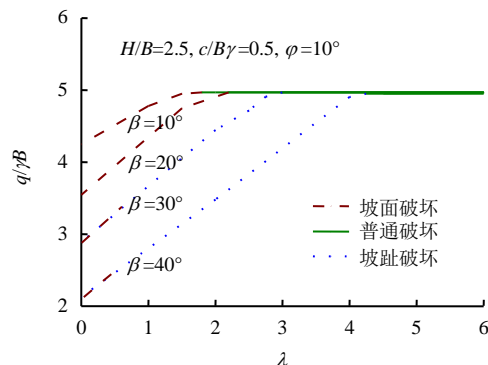


图 15 基础距离系数 λ 对承载力 $q/\gamma B$ 的影响
Fig.15 Influence of λ on bearing capacity $q/\gamma B$

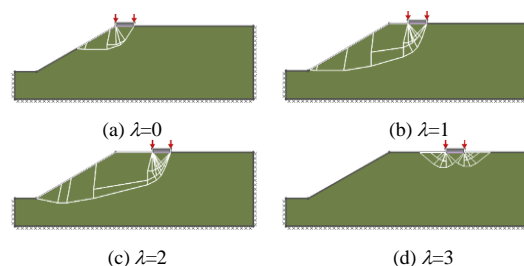


图 16 不同 λ 情况下边坡破坏模式图
($H/B=2.5$, $\beta=40^\circ$, $c/\gamma B=0.5$, $\varphi=10^\circ$)

Fig.16 Failure modes for various values of λ
($H/B=2.5$, $\beta=40^\circ$, $c/\gamma B=0.5$, $\varphi=10^\circ$)

4 国内外规范的设计方法评价

4.1 《建筑地基基础设计规范》设计方法评价

我国《建筑地基基础设计规范》^[21]指出,位于稳定土坡顶上的建筑物,对于条形基础,当垂直于边坡边缘线的基础底面边长小于或等于 3 m 时,其基础至坡肩的水平距离应符合下式要求,且不得小于 2.5 m,即

$$a \geq 3.5b - \frac{d}{\tan \beta} \quad (5)$$

式中: a 为基础至坡肩的水平距离; b 为垂直于坡顶边缘线的基础底面边长; d 为基础埋置深度; β 为边坡坡角。

规范建议当基础底面外边缘线至坡顶的水平距离不满足式(5)要求时,可根据基底平均压力按下式确定基础距离坡顶边缘的距离和基础埋深:

$$M_R/M_S \geq 1.2 \quad (6)$$

式中: M_S 为滑动力矩; M_R 为抗滑力矩。

此外,规范还规定,当边坡坡脚大于 45° 、坡高大于 8 m 时,尚应按式(6)验算坡体稳定性。

建筑地基基础设计规范推荐的方法有着在工程设计时便于应用的优点。对于条形基础,不考虑基

础埋深时(即式(5)中 $d=0$ m),规定基础应置放于3.5倍基础宽度之外(即 $\lambda \geq 3.5$)。

图17为DLO计算的基础置放临界距离 λ_c ,即基础-边坡体系发生Prandtl破坏模式(见图16(d)),此时边坡对极限承载力无影响。可见,临界距离 λ_c 随土体内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和边坡坡角 β 的增大而增大。对于饱和黏土或土体内摩擦角较小且边坡坡角较小时(如图17中工况组合区间a所示), λ_c 小于规范规定值3.5,即当基础距坡肩水平距离为3.5倍基础宽度及以内一定距离范围,不需要考虑边坡对承载力的减损,此时按照规范方法设计将偏安全,但造成空间不必要浪费;当土体内摩擦角较高时(如图17中工况组合区间b所示),临界距离 λ_c 将大于3.5,此时在临界范围内均需考虑边坡对承载力减损的影响,在 c 和 φ 均较大时(如 $\varphi=40^\circ$, $c/\gamma B=2$),该临界距离最大将达到10倍基础宽度。可见,工况组合区间b范围内按规范规定的安全距离进行设计是不安全的,在工程设计中仍需要考虑边坡存在对承载力的减损。

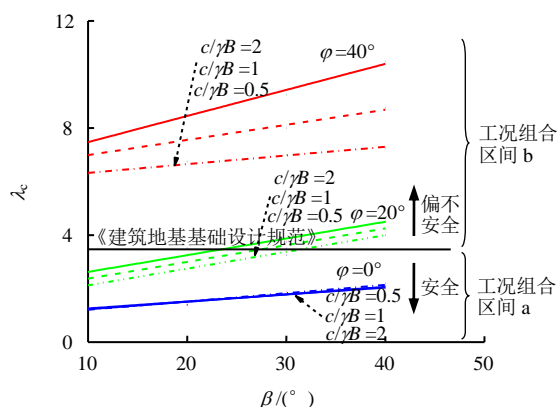


图17 不同参数对基础临界置放距离的影响
Fig.17 Influence of different parameters on the slope safety distance

4.2 美国 AASHTO 规范设计方法评价

美国 AASHTO 规范^[22]引用 Meyerhof^[5]基于极限平衡法得出的计算表格,该表格仅给出饱和黏土和砂土地基的计算结果。图18为基础宽度 $B=2$ m的条形基础分别置放于 $c/\gamma B=0$, $\gamma=20$ kN/m³, $\varphi=30^\circ$ 、 40° 和 45° 的不同坡角的砂土边坡地基上,本文结果与 AASHTO 规范对于砂土边坡地基承载力系数计算结果对比。可见,对于砂土地基, AASHTO 规范的承载力计算结果较为可靠。但该规范是基于极限平衡法得到的设计表格,计算时假设坡体稳定且基于坡面破坏,由图14可知,不同参数

情况下砂土边坡可能出现不同破坏模式,随 φ 增大,当破坏模式为坡底破坏,其结果会低估极限承载力。

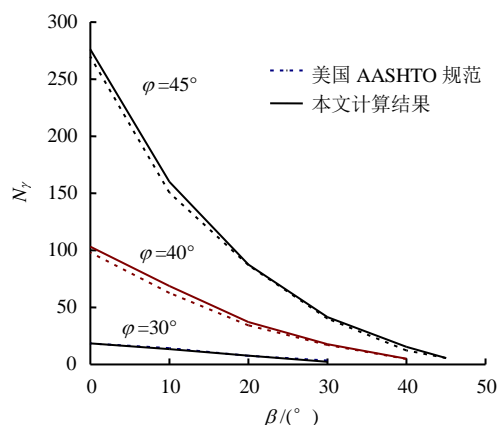


图18 AASHTO^[22]中砂土地基承载力系数
Fig.18 Bearing capacity factors for cohesionless soil in AASHTO^[22]

AASHTO 引用 $N_s = \gamma H / c$ 定义边坡尺寸和土体强度参数。图19为AASHTO规范的设计图,其中几处值得商榷。首先,当 $N_s > 0$ 时,意味着必然有边坡存在($H > 0$),此时图中边坡角度 $\beta=0^\circ$ 是没有意义的^[16]。其次,当基础位置足够远离边坡时,地基极限承载力将不受边坡几何构造影响,这意味着承载力系数 N_c 应趋近于Prandtl所得严格解($N_c=5.14$),而该规范中当 $N_s=2$ 、4时,承载力曲线平稳后承载力系数分别为3.2和1.5,这是有悖于理论解的。

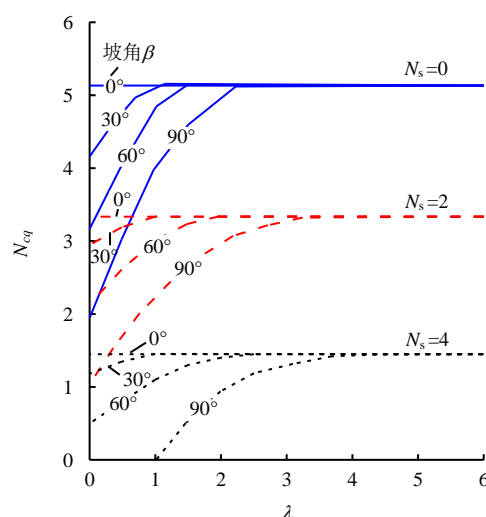


图19 AASHTO^[22]中饱和黏土地基承载力系数
Fig.19 Bearing capacity factors for cohesive soil in AASHTO^[22]

本文基于DLO法对AASHTO规范中饱和黏土工况进行了计算,如图20所示。当 $N_s=4$ 时,坡角

90°的土坡自身失稳, 图 19 中该工况承载力系数曲线应不存在。其他工况时, 随基础与边坡距离的增加, 承载力系数 N_c 趋近于 Prandtl 解答 ($N_c=5.14$), 并且 N_s 越大趋近速度越慢。对于临界距离的规定, Meyerhof 基于极限平衡法得出结论, “对于给定高度和坡度的土坡, 承载力系数随基础与边坡坡肩距离的增大而增大, 当该距离超过 2~4 倍边坡高度后承载力将与边坡坡角无关”^[15]。通过图 17 可知, 该结论仅在 $\varphi < 20^\circ$, $\beta < 40^\circ$ 时适用, 可见 Meyerhof 对边坡对临近基础临界影响距离的确定有局限性, 在土体强度高时会低估边坡对承载力减损的影响范围, 实际工程中可参照本文给出的临界距离值确定各参数组合条件下基础临近边坡置放临界距离。

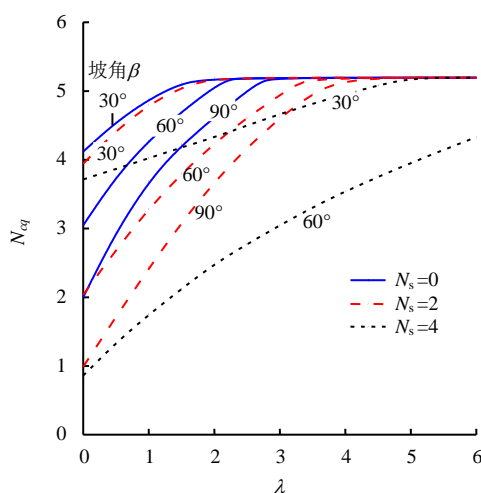


图 20 本文对 AASHTO^[22]饱和黏土地基承载力系数修正
Fig.20 Correction for bearing capacity factor for cohesive soil in AASHTO^[22]

5 结 论

本文采用 DLO 极限分析法对临近边坡刚性条形基础的地基极限承载力进行数值分析, 并与我国《建筑地基基础设计规范》及美国 AASHTO 规范推荐方法进行对比, 得出以下结论:

(1) 边坡高度对极限承载力具有显著影响, 存在临界高度 $(H/B)_c$, 当坡高小于该临界高度时, 随着坡高的增加, 坡底朗肯被动区减小, 承载力显著减小, 而当坡高大于临界高度, 在坡体稳定的情况下, 增加边坡高度对地基极限承载力没有影响。

(2) 边坡地基极限承载力随土体黏聚力及内摩擦角的增大而提高, 在坡体稳定情况下, 滑动破坏面随黏聚力的增大而变浅, 随内摩擦角的增大而变深, 延伸范围增大。

(3) 随基础与坡肩距离的增大, 承载力显著提

高。但超过临界距离 λ_c 时, 承载力不受 λ 影响, 边坡和土体参数均会对 λ_c 产生影响, 其值随土体内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和边坡坡角 β 的增大而增大。

(4) 对于条形基础临近边坡置放距离的规定, 我国现行《建筑地基基础设计规范》^[21]的方法简单易用, 但存在局限性。在 $\varphi=20^\circ$ 、 β 在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 范围内适用性好, 但在土体强度较弱、边坡坡角较小时, 在规范规定的最小距离内, 部分案例边坡不会对地基极限承载力造成减损, 此时按规范设计将造成空间浪费。当边坡土体强度较高且坡角较大时, 基础临界距离大于规范的最小设计距离, 此时, 在工程设计时应考虑边坡对承载力的减损。

(5) 美国 AASHTO 规范在砂土情况下, 承载力计算结果较为可靠, 但其计算方法仅考虑了坡面破坏一种破坏模式; 在饱和黏土时 AASHTO 引用 N_s 定义边坡尺寸和土体强度参数, 部分计算结果与理论解相悖, 本文对其进行修正。Meyerhof 对于坡顶基础临界置放距离的确定在土体强度较大时存在较大程度的低估。

边坡地基极限承载力、边坡破坏模式及影响范围是一个复杂的问题, 涉及到边坡坡体稳定问题与地基承载力问题的相互影响。边坡高度、坡角、土体黏聚力和内摩擦角均会对其有明显影响。本文研究各参数的影响情况, 为工程设计提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] 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 sloping ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(3): 381—387.
- [2] 尉学勇, 王晓谋, 贺培峰. 斜坡地基极限承载力下限解计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 77—82.
YU Xue-yong, WANG Xiao-mou, HE Pei-feng. Calculation of low limit solution of sloping ground ultimate load capacity[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2005, 22(4): 77—82.
- [3] PRANDTL L. Eindringungsfestigkeit und Festigkeit von Schneiden[J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1921: 115.
- [4] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1943.
- [5] MEYERHOF G G. The ultimate bearing capacity of

- foundations on slopes[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1957: 384—386.
- [6] 王红雨, 杨敏. 临近基坑条形基础地基承载力减损值的简化上限解[J]. 同济大学学报, 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**, 2006, 34(3): 319—324.
- [7] 王红雨, 杨敏. 临近基坑矩形浅基础地基承载力的上限估算[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1116—1122.
- WANG Hong-yu, YANG Min. Approximate upper-bound solution for bearing capacity of rectangular footings near excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(10): 1116—1122.
- [8] 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.
- [9] GRAHAM J, ANDREWS M, SHEILDS D H. Stress characteristics for shallow footings in cohesionless slopes[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1988, 25(2): 238—249.
- [10] BALIGH M M, AZZOUZ A S, LADD C C. Line loads on cohesive slopes[C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo, Japan: [s. n.], 1977: 13—17.
- [11] BALIGH M M, AZZOUZ A S. End effects on stability of cohesive slopes[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1975, 101: 1105—1117.
- [12] AZZOUZ A S, BALIGH M M. Loaded areas on cohesive slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 109(5): 724—729.
- [13] MICHALOWSKI R L. Three dimensional analysis of locally loaded slopes[J]. **Geotechnique**, 1989, 39(1): 27—38.
- [14] MICHALOWSKI R L. Upper-bound load estimates on square and rectangular footings[J]. **Geotechnique**, 2001, 51(9): 787—798.
- capacity analysis of a foundation near a slope[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(3): 153—163.
- [16] LESHCHINSKY B. Bearing capacity of footings placed adjacent to c' - ϕ' slopes[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(6). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001306.
- [17] 王红雨, 杨敏. 极限荷载作用下临近基坑 c - ϕ 土地基的破坏模式[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1677—1681.
- WANG Hong-yu, YANG Min. Analysis of soils failure zone of footings near excavations under ultimate load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1677—1681.
- [18] GEORGIADIS K. Undrained bearing capacity of strip footings on slopes[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(5): 677—685.
- [19] GEORGIADIS K. The influence of load inclination on the undrained bearing capacity of strip footings on slopes[J]. **Computers & Geotechnics**, 2009, 37(3): 311—322.
- [20] LimitState. LimitState: Geo manual v 3.0[M]. Sheffield, U.K.: [s. n.], 2013.
- [21] 中国建筑科学研究院. GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Chinese Academy of Building Research. GB 50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [22] AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Standard specifications for highway bridges. LRFD bridge design specifications[S]. 6th ed. Washington, DC: [s. n.], 2012: 45—66.
- [23] LESHCHINSKY B. Limit analysis optimization of design factors for mechanically stabilized earth wall-supported footings[J]. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, 2014, 1(2): 111—128.
- [24] SMITH C C, GILBERT M. Application of discontinuity layout optimization to plane plasticity problems[J]. **Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences**, 2007, 463(2086): 2461—2484.
- [25] SMITH C C, GILBERT M. Identification of rotational failure mechanisms in cohesive media using discontinuity layout optimisation[J]. **Géotechnique**, 2013, 63(14): 1194—1208.