

DOI: 10.11779/CJGE2017S2024

# 地震作用下临近边坡的条形基础极限承载力研究

尹鑫<sup>1,2</sup>, 周海祚<sup>1,2</sup>, 郑刚<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 地震荷载对基础的极限承载力起着不利影响, 但目前尚缺少系统的关于地震作用下的边坡地基极限承载力的研究。极限分析法是一种解决复杂岩土问题的严格分析方法, 利用基于极限分析上限法的 (discontinuity layout optimization (DLO)) 数值模拟技术, 通过拟静力法考虑水平地震作用, 对置放于边坡顶部条形基础的极限承载力进行研究, 给出了地震荷载作用下临近边坡条形基础的极限承载力系数设计图, 可用于地震荷载作用下边坡地基极限承载力的初步估算。研究表明, 与水平地基不同, 边坡地基的承载力研究同时涉及边坡稳定和极限承载力两类岩土工程问题, 土体自重、内摩擦角及黏聚力均会对其产生耦合影响。已往研究中承载力系数的计算沿用水平地基研究方法对  $N_c$ ,  $N_\gamma$  进行独立计算, 并线性叠加计算极限承载力, 未考虑边坡稳定问题对承载力研究带来的复杂性, 对  $c-\phi$  型边坡的极限承载力造成低估。

**关键词:** 地震; 临近边坡; 承载力; 条形基础; 极限分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0095-04

**作者简介:** 尹鑫(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下结构、地基处理方面的科研。E-mail: yinxin1992@tju.edu.cn。

## Seismic bearing capacity of strip footings adjacent to slopes

YIN Xin<sup>1,2</sup>, ZHOU Hai-zuo<sup>1,2</sup>, ZHENG Gang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The seismic load has an adverse effect on the bearing capacity of the footings. However, few studies are performed to study its impact on the bearing capacity of slopes. In this study, a rigorous analysis in the framework of the upper-bound limit state plasticity, known as the discontinuity layout optimization (DLO), is adopted to investigate the performance of footings placed on the top of slopes considering the horizontal seismic action by the pseudo-static method. A set of design charts containing the horizontal seismic acceleration are presented for preliminary estimates. The results show the differences from the horizontal foundation,  $c$ ,  $\phi$  and  $\gamma$  of foundation soil will produce coupling actions for this problem. But in the existing researches,  $N_c$  and  $N_\gamma$  are calculated separately and linearly superposed without considering the complexity of slope projects, thus the bearing capacity of  $c-\phi$  slope is underestimated.

**Key words:** earthquake; near slope; bearing capacity; strip footing; limit analysis

## 0 引言

工程实践中由于工程需要及地形条件的限制不可避免的需要将建筑物及构筑物基础设置在基坑附近或边坡顶部。近年来, 国内学者对于考虑地震作用下边坡问题主要集中于边坡稳定性评价及安全系数的研究<sup>[1]</sup>, 而对坡顶基础在地震作用下的承载力问题涉及较少。

陈昌富等<sup>[2]</sup>基于统一强度理论, 利用极限平衡和拟静力分析方法, 推导了邻近斜坡地基静、动承载力的计算公式, 胡啸<sup>[3]</sup>采用拟静力法模拟水平地震作用力, 讨论了在地震作用下边坡的稳定性以及临坡地基极限承载力变化规律。Kumar 等<sup>[4]</sup>首先将滑移线法扩展到考虑地震作用的坡顶基础地基承载力研究, 考虑

了双侧破坏和单侧破坏两种破坏模式, 对于承载力的计算以承载力叠加公式表示:

$$p_{ult} = cN_c + qN_q + \frac{\gamma B}{2}N_\gamma \quad (1)$$

分别令  $c=0$  计算承载力系数  $N_q$  和  $N_\gamma$ , 令  $\gamma=0, q=0$  计算承载力系数  $N_c$ 。并绘制出不同地面坡度情况下  $N_c$ ,  $N_q$  和  $N_\gamma$  在水平地震加速度  $a_h$  作用下的变化曲线。此后, Ghosh 等<sup>[5]</sup>应用极限分析上限法, 研究基础位于边坡上一定埋深并考虑埋深以上土体剪切阻力时的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41630641, 51378345); 国家重点研发计划 (2016YFC0802008)

收稿日期: 2017-08-02

承载力系数  $N_c$ ,  $N_\gamma$  随水平地震加速度  $a_h$  的变化情况。Choudhury 等<sup>[6]</sup>采用极限平衡法计算了嵌入边坡的浅基础承载力系数  $N_c$ ,  $N_\gamma$ 。Kumar 等<sup>[7]</sup>将下限解与有限元法及非线性最优化方法相结合, 计算基础位于无黏性边坡表面时, 水平地震作用下的承载力系数  $N_\gamma$ 。

以上研究无论是采用极限平衡法、极限分析上限法、下限法以及极限分析法与有限元相结合的计算方法, 其对承载力系数的计算均是沿用地基承载力系数的研究方法, 将  $N_c$ ,  $N_q$  和  $N_\gamma$  的影响单独考虑、线性叠加, 即分别令  $c \neq 0$ ,  $\gamma = q = 0$  计算  $N_c$ , 令  $q \neq 0$ ,  $\gamma = c = 0$  计算  $N_q$ , 令  $\gamma \neq 0$ ,  $c = q = 0$  计算  $N_\gamma$ 。

与水平地基承载力问题不同, 边坡地基承载力研究的复杂性表现在边坡自身几何尺寸、土体自重及强度参数均会影响边坡稳定性从而对承载力的计算产生影响。针对现行研究存在的问题, 本文采用基于极限分析上限法的 DLO 方法计算  $c-\varphi$  型土边坡地基在水平地震作用下的承载力系数, 并进一步讨论地震作用下边坡土体自重对承载力的影响。

## 1 数值模型及验证

### 1.1 计算方法、数值模型及参数介绍

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。Discontinuity Layout Optimization (DLO)<sup>[8]</sup>应用了极限分析法, 并且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。

建立二维边坡上条形基础在水平地震作用下的 DLO 分析模型, 如图 1 所示, 刚性条形基础宽度为  $B$ , 置放于边坡坡顶位置, 边坡坡高为  $H$ , 坡角为  $\beta$ 。为考虑水平地震作用的影响, 定义两处额外的水平荷载作用: ①基础与土体界面上沿水平方向的切向荷载  $Q_h = k_h Q_u$ ; ②作用在土体单位质量上的水平体力  $k_h \gamma$ 。其中  $Q_u$  为地震作用下土体失效破坏的极限荷载。

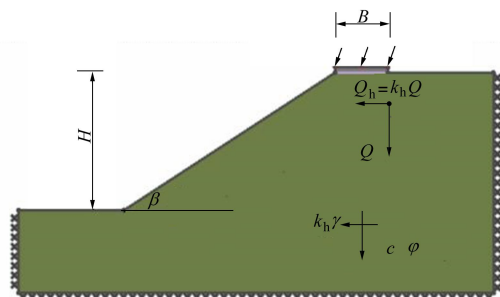


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical model

### 1.2 模型验证

为了验证本文计算模型对于地震作用下承载力

计算的适用性, 本节将本模型对考虑地震作用下承载力系数计算结果与前人计算结果进行对比分析。

图 2 为基础置放于坡角  $\beta = 20^\circ$ ,  $30^\circ$  的边坡顶部, 在水平地震作用下的  $N_\gamma$  值计算结果分别与 Kumar 等采用的滑移线法<sup>[4]</sup>、极限平衡法<sup>[10]</sup>、极限分析下限法<sup>[7]</sup>的计算结果进行对比。可见, Kumar 等采用的极限平衡法与本模型结果在水平地震用作较小时较为一致, 而在  $k_h > 0.25$  后略高。滑移线法对承载力的计算结果相较于本模型较低, 出现此现象的原因是 Kumar 等在计算中假设基础底与土体界面剪应力与正应力比值始终等于  $k_h$ , 该假设在水平地震  $k_h = 0$  时即认为基础与土体之间是完全光滑的, 这显然会低估承载力。在本模型计算中, 令基础与土体界面处水平向剪力与垂直作用力比值为  $k_h$ , 而在沿界面的任意一点处, 由于基础与土体界面完全粗糙, 最大的剪应力值始终等于  $-\sigma_y \tan \varphi$ 。基于此原因, 相比于本模型计算结果, Kumar 等得出的结果较为保守。

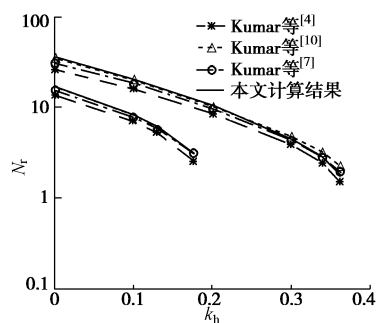


图 2 DLO 对  $N_\gamma$  的计算结果与已有解答对比

Fig. 2 Comparison between DLO and present results for  $N_\gamma$

## 2 地震作用下承载力计算

地震作用下极限承载力参照 Terzaghi<sup>[1]</sup>地基承载力的叠加公式表示:

$$q_u = \frac{Q_u}{B} = cN_c + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma \quad (2)$$

式中,  $Q_u$  为基础滑动破坏时的极限荷载,  $B$  为基础宽度,  $c$  为边坡土体黏聚力,  $\gamma$  为土体重度,  $N_c$ ,  $N_\gamma$  为地震作用下的承载力系数。

### 2.1 $c-\varphi$ 型土坡在地震作用下承载力系数

$c-\varphi$  型土坡在地震作用下承载力由  $N_c$ ,  $N_\gamma$  两系数共同确定。图 3 为土体内摩擦角  $\varphi = 10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ , 边坡坡度  $\beta = 10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  和  $40^\circ$  时  $c-\varphi$  型土边坡地震承载力系数  $N_c$  随水平地震加速度  $k_h$  变化曲线。对于  $c-\varphi$  型土坡, 其重力对于承载力的作用由  $N_\gamma$  体现, 故对于  $N_c$  的计算不考虑土体自重, 黏聚力  $c$  对  $N_c$  值无影响。由图 3 可见,  $N_c$  随坡度  $\beta$  增大而降低, 随内摩擦角  $\varphi$  的增大而提高, 随水平地震加速度  $k_h$  的增大而显著减小。

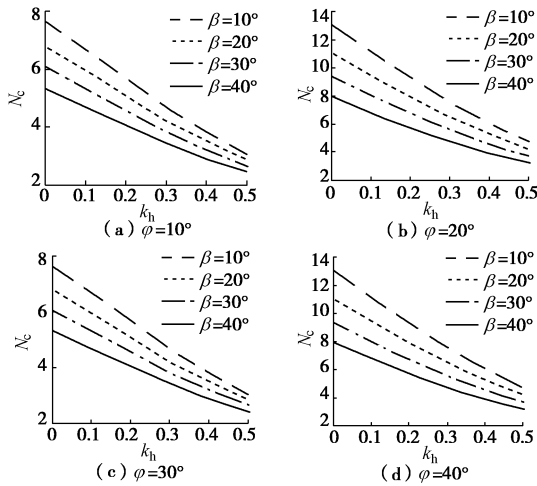
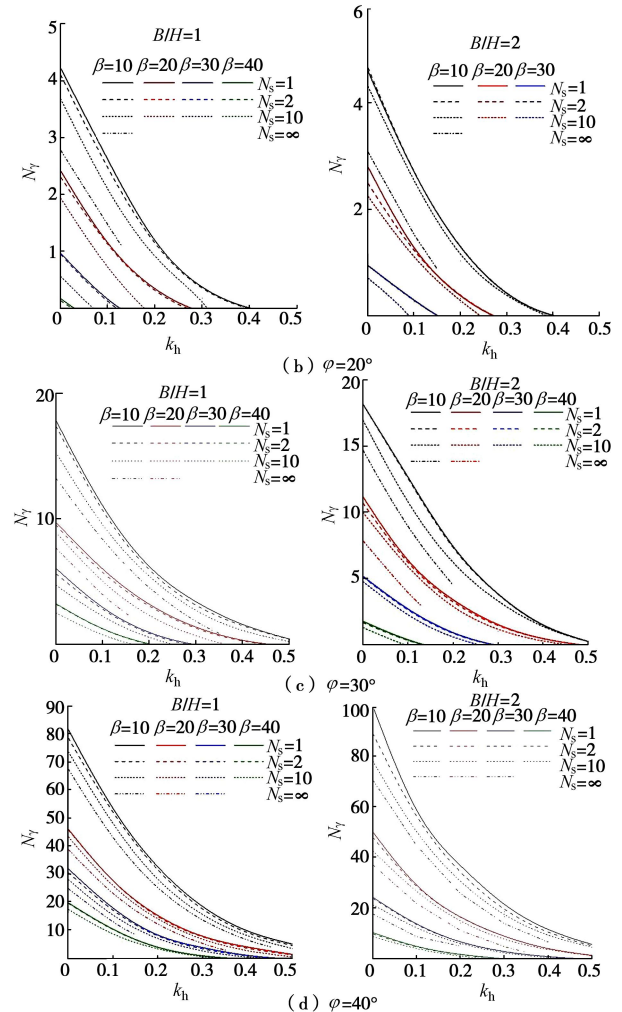
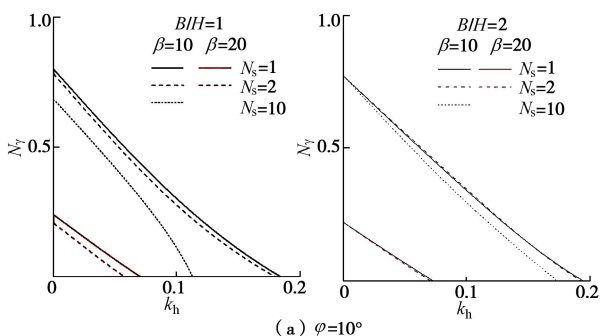
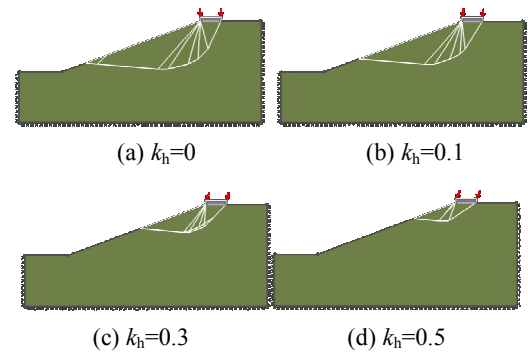
图 3  $N_c$  随  $k_h$  和  $\beta$  的变化曲线Fig. 3 Variation of  $N_c$  with  $k_h$  and  $\beta$ 

图 4 为承载力系数  $N_\gamma$  在不同边坡几何尺寸 ( $H/B=0.2, 1.0$ ,  $\beta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ ) 情况下, 边坡稳定系数  $N_s=1, 2, 10$  及  $\infty$ , 内摩擦角  $\varphi=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  和  $40^\circ$  时随水平地震加速度  $k_h$  的变化曲线。可见, 地震作用下承载力系数  $N_\gamma$  随边坡坡度  $\beta$  增大而减小, 随土体内摩擦角  $\varphi$  增大而显著提高。当不考虑边坡几何尺寸及土体参数的影响时,  $N_\gamma$  随水平地震加速度  $k_h$  增大而显著减小。当边坡稳定系数  $N_s=\infty$  (即  $c=0$  kPa) 时, 对于给定的  $k_h$ , 其能保持边坡自身稳定的最大值  $k_h=k_{h,\max}$ , 其中  $k_{h,\max}=\tan(\varphi-\beta)$ , 因此, 对于  $c=0$  kPa, 其  $N_\gamma$  计算范围仅为  $kh \leq k_{h,\max}$ 。当考虑土体黏聚力时, 承载力系数  $N_\gamma$  计算范围将大幅扩大, 对于给定高度的边坡, 黏聚力越大, 边坡稳定系数  $N_s=\gamma H/c$  越小, 边坡稳定性越高, 承载力系数  $N_\gamma$  越大。 $c=0$  kPa 时的  $N_\gamma$  值是承载力系数的最小值。可见 Choudhury 等<sup>[6]</sup>、Kumar 等<sup>[4-5, 7, 10]</sup> 按此值进行  $c-\varphi$  型土坡顶基础的承载力计算将出现不同程度的低估。

## 2.2 地震作用对破坏模式的影响

图 5 为基础置放于高度  $H=2.5$  m,  $c=10$  kPa,  $\varphi=40^\circ$  边坡顶部时, 滑动破坏模式随水平地震加速度  $k_h$  增加的变化图。可见在极限荷载作用下基础下方均存在刚性三角区, 随  $k_h$  增大, 刚性三角区向边坡方向偏转, 从而整体滑动面变浅, 极限承载力降低。

图 4  $c-\varphi$  型边坡顶部基础的承载力系数  $N_\gamma$  设计图Fig. 4 Design charts of  $N_\gamma$  for spread footings adjacent to slopes of  $c-\varphi$  soils图 5  $H=2.5$  m,  $c=10$  kPa,  $\varphi=40^\circ$  破坏模式图Fig. 5 Failure patterns for  $H=2.5$  m,  $c=10$  kPa,  $\varphi=40^\circ$ 

## 2.3 对比分析

采用 Kumar 等<sup>[7, 9]</sup> 得出的承载力系数值及其承载力计算方法分别计算基础位于  $c=0$  kPa,  $\varphi=40^\circ$ ,  $\beta=20^\circ, 30^\circ$  及  $c=50$  kPa,  $\varphi=30^\circ$ ,  $\beta=10^\circ, 20^\circ$  边坡顶部的极限承载力, 并与本文计算结果进行对比, 结果如图 6, 7 所示。由图 6 可见, 对于无黏性土边坡, Kumar 等计算结果较为准确, 而对于  $c-\varphi$  型土边坡, Ghosh 等对于置放于边坡顶部基础的地基极限承载力

计算由于其均是将纯砂性土边坡的  $N_\gamma$  值与无重边坡的  $N_c$  值单独计算进而线性叠加, 未考虑土体黏聚力对边坡稳定性及  $N_\gamma$  的贡献作用, 从而对承载力的计算存在低估, 如图 7 可见。且由于对于  $N_\gamma$  值的计算未考虑土体黏聚力, 其对于  $c-\varphi$  型土边坡在水平地震作用下承载力的计算范围具有局限性。

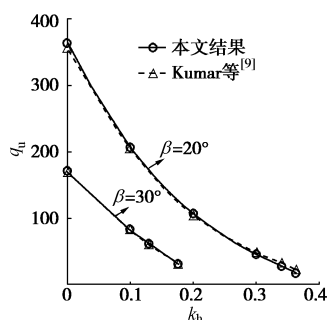


图 6  $\varphi=40^\circ$ ,  $c=0$  kPa 极限承载力对比

Fig. 6 Comparison of  $q_u$  with different values of  $k_h$  for  $\varphi=40^\circ$ ,  $c=0$  kPa

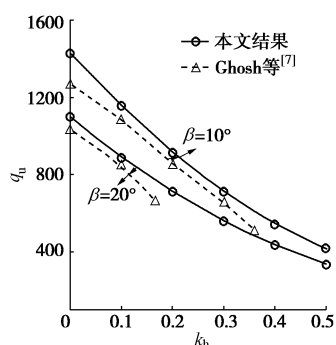


图 7  $\varphi=30^\circ$ ,  $c=50$  kPa 极限承载力对比

Fig. 7 Comparison of  $q_u$  with different values of  $k_h$  for  $\varphi=30^\circ$ ,  $c=50$  kPa

### 3 结 论

采用基于极限分析上限法的 DLO 方法建立数值模型, 通过拟静力法考虑水平地震作用对置放于边坡顶部刚性基础的极限承载力进行研究, 绘制了  $c-\varphi$  型土边坡在地震作用下的承载力系数图。

对于  $c-\varphi$  型土边坡, 土体自重对于承载力的作用由  $N_\gamma$  体现, 黏聚力  $c$  对  $N_\gamma$  具有显著影响,  $c$  越大边坡稳定性越高, 从而  $N_\gamma$  值增大, 若将纯砂性土的  $N_\gamma$  值带入  $c-\varphi$  型土边坡进行叠加而不考虑黏聚力对承载力系数  $N_\gamma$  值的贡献作用将低估承载力。

本文研究指出了已有文献计算方法对于承载力系数单独计算、线性叠加, 而未能考虑边坡尺寸、土体重度及黏聚力对边坡地基承载力的影响的局限性, 给出地震承载力系数  $N_c$ ,  $N_\gamma$  设计图, 并对  $c-\varphi$  型土边坡给出承载力计算方法, 使其可以适用于更大范围边坡

参数组合下的地震承载力初步估算, 并且计算结果更准确, 克服了前人对于对  $c-\varphi$  型土边坡计算低估的缺点。

### 参考文献:

- [1] 张鲁渝, 时卫民, 郑颖人. 平面应变条件下土坡稳定有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 487 - 490. (ZHANG Lu-yu, SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. The slope stability analysis by FEM under plane strain conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 487 - 490. (in Chinese))
- [2] 陈昌富, 唐仁华, 唐彦哲. 临近斜坡地基承载力计算新方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(4): 1 - 6. CHEN Chang-fu, TANG Ren-hua, TANG Yan-zhe. A new calculation method for the seismic bearing capacity of shallow strip footings close to slope[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [3] 胡 啸. 基于极限分析上限有限元法的临坡地基承载力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015. (HU Xiao. Study on the bearing capacity of foundation near the slope based on the finite element upper bound limit analysis[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese))
- [4] KUMAR J, RAO V B K M. Seismic bearing capacity of foundations on slopes[J]. Géotechnique, 2003, 53(3): 347 - 361.
- [5] GHOSH P, KUMAR J. Seismic bearing capacity for embedded footings on sloping ground[J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 133 - 140.
- [6] CHOUDHURY D, RAO K S S. Seismic bearing capacity of shallow strip footings[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, 23(4): 403 - 418.
- [7] KUMAR J, CHAKRABORTY D. Seismic bearing capacity of foundations on cohesionless slopes[J]. Geomechanics & Geoengineering, 2013, 8(4): 347 - 361.
- [8] Limit State. Limit State: Geo manual v 3.0[M]. U.K: Sheffield, 2013.
- [9] LESHCHINSKY B. Bearing Capacity of Footings Placed Adjacent to  $c'-\varphi'$  Slopes[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(6): 04015022.
- [10] KUMAR J, KUMAR N. Seismic bearing capacity of rough footings on slopes using limit equilibrium[J]. Géotechnique, 2003, 53(3): 363 - 369.
- [11] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: N Y John Wiley & Sons Inc, 1943.