

DOI: 10.11779/CJGE2019S1004

# 软土地区偏压基坑抗隆起稳定安全系数的 强度折减法研究

史 吏<sup>1</sup>, 倪定宇<sup>1</sup>, 闫自海<sup>2</sup>, 陈 娟<sup>2</sup>, 胡敏云<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘 要:** 针对偏压工况下软土地区基坑开挖的坑底隆起问题, 建立了二维有限元强度折减分析模型。对偏压范围、偏压距离以及偏压荷载大小对抗隆起稳定安全系数的影响进行了数值模拟分析, 同时对比了极限平衡法、极限分析法和上述数值方法在偏压工况下的抗隆起稳定安全系数。结果表明: 偏压范围越大或偏压距离越小, 基坑抗隆起稳定安全系数越小; 不同深宽比下的基坑抗隆起稳定安全系数均随偏压荷载大小增加而线性减小; Terzaghi 极限平衡法和极限分析法均高估了偏压基坑的抗隆起稳定性, 偏危险; Bjerrum&Eide 极限平衡法和基于 Prandtl 机构的规范法低估了偏压基坑的抗隆起稳定性, 偏保守。

**关键词:** 基坑; 偏压荷载; 抗隆起稳定性; 有限元法; 强度折减法

中图分类号: TU432; TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0013-04

**作者简介:** 史 吏(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土与结构相互作用和地基处理研究工作。E-mail: 418194187@qq.com。

## Strength reduction method for safety coefficient of heave-resistant stability of asymmetrically-loaded excavations in soft soil areas

SHI Li<sup>1</sup>, NI Ding-yu<sup>1</sup>, YAN Zi-hai<sup>2</sup>, CHEN Juan<sup>2</sup>, HU Min-yun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** A two-dimensional finite element model incorporating the strength reduction method is established to study the base heave problem encountered in asymmetrically-loaded excavations in soft soils. The parametric studies are conducted to investigate the influences of distribution range, distance from the bracing structures and amplitude of the asymmetric loading on the base-heave resistance factor. Meanwhile, comparisons are made among the above numerical results, the limit equilibrium method and the limit analysis method. The analysis results show that the heave-resistance factor decreases when the distribution range of the asymmetric loading increases or the distance between the asymmetric loading and the bracing structures decreases. The base-heave resistance factors of excavations with different depth/width ratios all show a linear decrease with the increasing amplitude of asymmetric loading. Compared to the strength reduction method, both the Terzaghi limit equilibrium method and the limit analysis method overestimate the base-heave resistance factor of an asymmetrically-loaded excavation, while both the Bjerrum & Eide limit equilibrium method and the code method (based on Prandtl mode) are conservative since they underestimate the factor.

**Key words:** excavation; asymmetric loading; heave-resistant stability; finite element method; strength reduction method

## 0 引 言

基坑开挖时被动区土体卸载, 同时坑边材料、弃土堆放以及施工机械移动等地表因素会在基坑一侧形成偏压荷载, 如图 1 所示的单侧超载及坑底卸载使得基坑处于偏压状态, 可能引起坑底回弹变形甚至发生坑底隆起破坏。这一工程问题在沿海软土地区尤为突出, 因而有必要针对偏压工况开展软土地区基坑抗隆起稳定性研究。现有基坑抗隆起稳定问题的数值分析,

多是基于强度折减法。该法被广泛用于分析不同基坑开挖工况 (H. Faheem 等<sup>[1]</sup>)、土体强度 (李忠超等<sup>[2]</sup>) 和本构模型 (胡安峰等<sup>[3]</sup>) 下的基坑抗隆起稳定性问题。Do 等<sup>[4]</sup>采用有限元强度折减法分析了基坑隆起变形, 计算结果与现场测试结果基本一致, 表明了有限

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51608482, 51879234)

收稿日期: 2019-04-29

\*通讯作者 (E-mail: huminyun@zjut.edu.cn)

元强度折减法分析基坑抗隆起问题的有效性。

结合基坑工程实际应用现状, 本文采用有限元强度折减法分析了不同偏压范围、距离和偏压荷载大小下的软土基坑抗隆起稳定性问题, 并与极限平衡法和极限分析法的理论计算结果进行了对比, 初步明确了二者理论在偏压基坑开挖抗隆起稳定性判断中适用性。

## 1 无偏压基坑数值模型验证

H. Faheem 等<sup>[1]</sup>采用强度折减法研究了基坑深宽比对抗隆起稳定性的影响。该基坑土体基本参数(见表 1)和开挖参数(挖深  $H=9$  m, 挡墙入土深度  $D=0$  m, 坑底软土厚度  $T=T_c$ ,  $T_c$  为软土层临界深度, 取  $T_c=B/\sqrt{2}$ ) 均与 H. Faheem 等<sup>[1]</sup>所采用的算例相同。

表 1 土体基本参数

Table 1 Basic parameters of soils

参数	取值
不排水抗剪强度 $s_u$ /kPa	35.0
卸荷模量 $E$ /kPa	250 $s_u$
泊松比 $\nu$	0.49
土体重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	20.0

在 Plaxis 2D 中, 采用 15 节点高阶三角形平面应变单元离散土体, 采用板单元模拟支护结构, 土体单元和板单元之间的接触采用 Plaxis 界面强度折减因子定义, 有限元离散网格如图 1 所示。

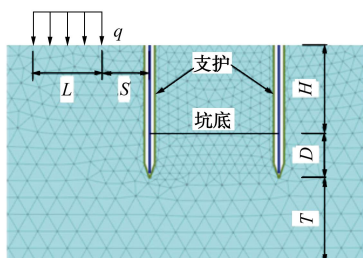


图 1 基坑有限元模型及网格划分

Fig. 1 Finite element model for excavations

在基坑开挖时, 坑底土体处于卸荷状态, 选用的土体本构模型需合理反映卸荷应力路径下的土体变形。已有基坑开挖数值模拟分析中, 多采用 HS 土体硬化模型<sup>[3]</sup>和 M-C 模型<sup>[2]</sup>进行分析。其中, HS 模型中定义了卸荷模量, 比较适用于卸荷工况, 但该模型参数偏多, 且部分参数测定困难<sup>[5]</sup>。与之相对, M-C 模型的本构参数少且易于室内测定, 本文采用该模型模拟软黏土, 并将土体的卸荷模量赋值给模型中的模量参数, 从而反映卸荷模量区别于弹性模量的土体特征, 类似处理方法可参见文献[6]。

强度折减法分析坑底隆起时特征点位置的选择目前尚无定论。H. Faheem 等<sup>[1]</sup>认为特征点为位移最大的节点, 一般取在坑底中心或支护结构内侧土体附近。胡安峰等<sup>[3]</sup>认为, 挡墙内侧土体各点的安全系数取值

接近, 更适合作为强度折减法的特征点。Do 等<sup>[4]</sup>分析结果表明三个特征点的节点位移 - 折减系数关系曲线拐点相近。本文取坑底中心点作为特征点分析。

在 Plaxis 中对 M-C 模型中的不排水抗剪强度  $s_u$  进行折减分析, 可得基坑不同深宽比  $H/B$  条件下, 坑底中心特征点位移随强度折减系数的变化曲线, 如图 2 所示。图中, 纵坐标  $\Delta$  为特征点的无量纲节点位移。由图可知, 本文模型计算结果与 H. Faheem 结果基本一致, 说明了本文强度折减法的合理性。

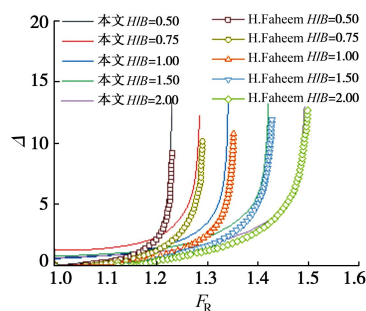


图 2 节点位移 - 折减系数变化对比曲线

Fig. 2 Variation curves of nodal displacement vs. SRR curves

## 2 偏压范围、距离以及偏压大小的影响

在 H. Faheem 算例<sup>[1]</sup>的基础上施加偏压荷载, 如图 1 所示。其中,  $H$  为基坑开挖深度,  $D$  为支护结构嵌固深度,  $T$  为支护结构底端至硬土层的距离。在基坑左侧施加均布荷载  $q$ ,  $L$  为偏压荷载的分布范围,  $S$  为偏压荷载边缘至基坑护壁外侧的距离。土体参数见表 1。

研究偏压范围对基坑抗隆起稳定安全系数  $F_s$  的影响, 取不同偏压荷载范围  $L/H$ , 偏压距离  $S=0$ , 偏压荷载大小  $q/s_u=0.57$ , 基坑深宽比  $H/B=0.75, 1.50$ 。

不同基坑深宽比取值下的坑底中心节点位移随强度折减系数的变化情况分别如图 3 (a), (b) 所示, 各曲线均存在明显拐点, 随着偏压范围增大, 拐点对应的折减系数减小。不同深宽比  $H/B$  条件下, 拐点分布范围随  $H/B$  增大而变窄 ( $0.084 \rightarrow 0.070$ ), 说明偏压范围对宽浅基坑 (即  $H/B$  小) 抗隆起稳定性的影响更大。

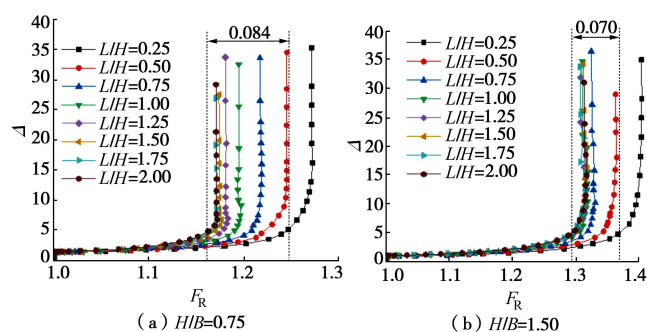


图 3 不同偏压范围  $L/H$  下的节点位移 - 折减系数变化曲线

Fig. 3 Nodal displacement vs. SRR curves under different asymmetrically-loaded ranges  $L/H$

研究偏压距离对基坑抗隆起稳定安全系数  $F_s$  的影响, 取不同偏压距离  $S/H$ , 偏压范围  $L=H$ , 偏压荷载大小  $q/s_u=0.57$ , 基坑深宽比  $H/B=0.75, 1.50$ 。如图 4 (a), (b) 所示, 各曲线均存在明显拐点, 相同深宽比  $H/B$  条件下, 随着偏压距离  $S$  增大, 拐点对应的折减系数增大。不同深宽比  $H/B$  条件下, 拐点分布范围随  $H/B$  增大而变窄 ( $0.076 \rightarrow 0.065$ ), 说明偏压距离对宽浅基坑的影响更大。

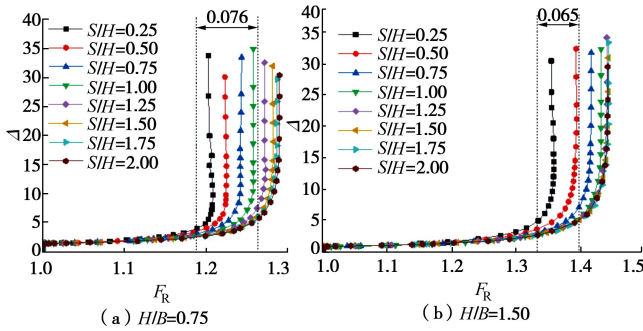


图 4 不同偏压距离  $S/H$  下节点位移 - 折减系数关系曲线  
Fig. 4 Nodal displacement vs. SRR curves under different asymmetrically-loaded distances  $S/H$

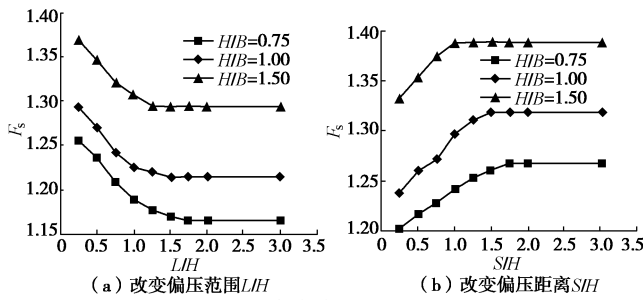


图 5 抗隆起稳定安全系数结果汇总

Fig. 5 Results of safety factor of heave-resistant stability

将图 3, 4 各曲线的拐点对应的安全系数汇总于图 5。图 5 (a) 表明: 当偏压范围较小 ( $L/H < 1$ ) 时, 抗隆起稳定安全系数随偏压范围增大而线性减小; 偏压范围继续增大时, 安全系数则变化较小。当  $H/B=0.75, 1.00, 1.50$  时, 偏压范围分别达到  $1.75H, 1.50H, 1.25H$  后, 继续增大偏压范围而安全系数保持不变, 说明对于窄深基坑 (即  $H/B$  大) 偏压范围的影响更小。图 5 (b) 表明: 偏压距离较小 ( $S/H < 1$ ) 时, 抗隆起稳定安全系数随偏压距离增大而线性增大; 偏压距离继续增大时, 抗隆起稳定安全系数保持不变。当  $H/B=0.75, 1.00, 1.50$ , 偏压距离分别达到  $1.75H, 1.5H, 1.25H$  后, 继续增大偏压距离而安全系数保持不变, 说明对于窄深基坑 (即  $H/B$  大) 偏压距离的影响更小。

分别取偏压荷载  $q/s_u=0, 0.29, 0.57, 0.86, 1.14$ , 取偏压距离  $S=0$ , 偏压范围  $L=H$ , 基坑深宽比  $H/B=1.00$ 。图 6 呈现了不同偏压荷载下的基坑抗隆起稳定安全系数  $F_s$  随深宽比  $H/B$  变化的情况。由图 6 可知,  $F_s$  随  $H/B$  增大而增大, 不同偏压大小  $q/s_u$  下各条

变化曲线是近似相互平行的, 表明深宽比不会影响  $F_s$  随偏压荷载增大而线性减小的总体规律。

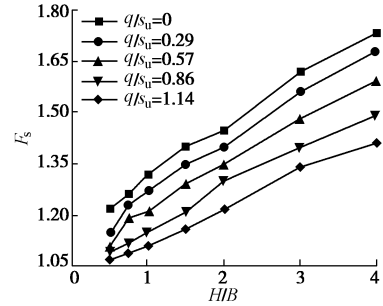


图 6 不同偏压荷载大小  $q/s_u$  下安全系数随  $H/B$  变化曲线

Fig. 6 Variation curves of safety factor with  $H/B$  under different asymmetrically-loaded values of  $q/s_u$

### 3 偏压工况下抗隆起稳定安全系数计算方法对比

常用的极限平衡法和极限分析法无法考虑偏压范围和距离, 而图 5 结论表明  $L/H > 1$  时偏压范围影响减小。故以下算例取  $L=H, S=0, q/s_u=0.57$ , 由图 7 可知,  $H/B < 1$  时, Bjerrum&Eide 法结果明显偏小, 而其他方法结果接近; 当  $H/B > 1$  时, Terzaghi 极限平衡法计算结果迅速增大, 说明 Terzaghi 极限平衡法高估了窄深基坑的稳定性; Bjerrum&Eide 法计算结果仍然小于极限分析法和有限元强度折减法; 两种机构场的极限分析法安全系数与有限元强度折减法计算结果较为接近, 但随  $H/B$  增大, 极限分析法的安全系数普遍大于有限元强度折减法, 表明极限分析法可能高估了偏压工况下窄深基坑的抗隆起稳定性。

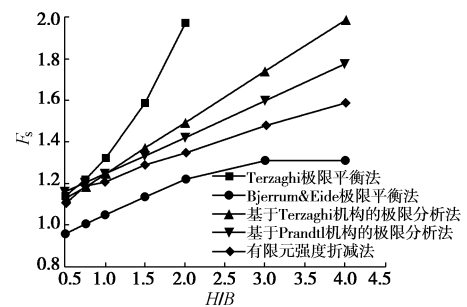


图 7 安全系数随  $H/B$  变化结果对比

Fig. 7 Comparison of safety factors under different values of  $H/B$

图 8 为  $H/B=0.75$  时基坑抗隆起稳定安全系数随偏压荷载的变化情况。由图 8 可知三种分析方法均正确预测了抗隆起稳定系数随偏压荷载增大而线性减小的规律, 但基于 Terzaghi 模式的极限平衡法以及基于 Terzaghi 机构和 Prandtl 机构的极限分析法的安全系数均大于本文强度折减法的安全系数, 说明了上述计算方法可能偏危险。而 Bjerrum & Eide 法计算结果明显小于 Terzaghi 极限平衡法、极限分析法与有限元强度折减法的结果, 同样说明该法低估了偏压工况下基坑

抗隆起稳定性；同时基于 Prandtl 机构的极限平衡法（即规范法）的计算结果远小于其余方法，说明规范法在计算偏压工况下的基坑抗隆起稳定安全系数时是偏保守的。

相比较而言，极限分析法的结果比较接近强度折减法计算结果。同时，随着基坑深宽比增大，基于 Prandtl 机构的极限分析法结果更优，更适合用于偏压工况下窄深基坑抗隆起稳定性的理论分析。

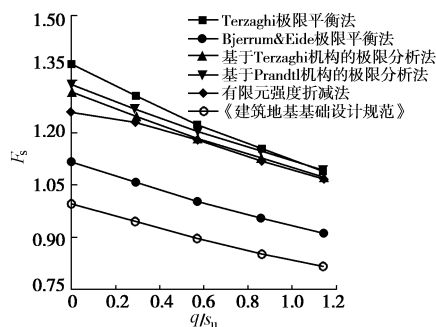


图8 安全系数随  $q/s_u$  变化曲线

Fig. 8 The variation curve of safety coefficient with  $q/s_u$

分别将  $H/B=0.75, 1.00, 1.50$  时有限元强度折减法的  $F_s$  除以规范法的  $F_s$  作为纵坐标，偏压大小  $q/s_u$  为横坐标，得图9。随着偏压大小  $q/s_u$  增大，两方法的安全系数比值增大；随  $H/B$  增大，有限元强度折减法与规范法的  $F_s$  差距增大。结果表明：偏压荷载较大时规范法比有限元强度折减法更加保守；用规范法计算窄深基坑（即  $H/B$  大）抗隆起稳定安全系数时，可将结果提高一定比例。

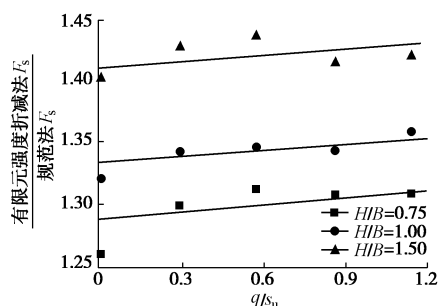


图9 有限元强度折减法与规范法的  $F_s$  比值对比曲线

Fig. 9 Comparison curves between the results of FEM strength reduction method and the code method

## 4 结论与建议

本文通过强度折减法对不同偏压工况下（偏压大小、偏压距离和偏压范围）的基坑抗隆起稳定安全系数进行了参数分析，并与极限平衡法、极限分析法以及规范法进行了对比分析，可得如下主要结论：

（1）偏压范围越大或偏压距离坑边越近，基坑抗隆起稳定安全系数越小。相对窄深基坑，偏压范围和

偏压距离对宽浅基坑抗隆起稳定性的影响更大。

（2）不同基坑深宽比下的基坑抗隆起稳定安全系数均呈现出随偏压荷载大小的增加而线性减小的规律。

（3）基于 Terzaghi 模式的极限平衡法以及基于 Terzaghi 机构和 Prandtl 机构的极限分析法均可能高估了偏压基坑的抗隆起稳定安全系数，偏危险；基于 Bjerrum & Eide 模式和规范法明显低估了偏压基坑的抗隆起稳定安全系数，两者相比较时，规范法更保守。

（4）在几种常用的基坑抗隆起稳定性分析方法中，基于 Prandtl 机构的极限分析法更适用于偏压工况下的基坑抗隆起稳定性分析。

## 参考文献：

- [1] H FAHEEM H, CAI F, UGAI K, et al. Two-dimensional base stability of excavations in soft soils using FEM [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(2): 141 - 163.
- [2] 李忠超, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软黏土中某内支撑式深基坑稳定性安全系数分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 669 - 775. (LI Zhong-chao, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Factor of safety of a braced deep excavation in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 669 - 775. (in Chinese))
- [3] 胡安峰, 陈博浪, 应宏伟. 土体本构模型对强度折减法分析基坑整体稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 592 - 597. (HU An-feng, CHEN Bo-lang, YING Hong-wei. Influences of constitutive models on overall stability analysis of deep excavations using strength reduction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 592 - 597. (in Chinese))
- [4] DO T N, OU C Y, LIM A. Evaluation of factors of safety against basal heave for deep excavations in soft clay using the finite element method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(12): 2125 - 2135.
- [5] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258 - 264. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258 - 264. (in Chinese))
- [6] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选择[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86 - 94. (SONG Guang, SONG Er-xiang. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 86 - 94. (in Chinese))