

基坑抗隆起稳定安全系数的算法对比分析

李金锁

(中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

摘要: 基坑隆起变形破坏是一种常见的基坑失稳形式。基坑隆起变形量监测存在一定困难, 基坑坑底抗隆起稳定性分析主要是计算安全系数。目前基坑抗隆起稳定安全系数计算方法主要有极限平衡、极限分析和强度折减等方法。结合工程算例, 采用上述3种算法进行基坑抗隆起稳定安全系数计算, 对比分析了各种计算方法的适用性。结果表明, 极限平衡传统算法忽略的工程因素较多, 计算结果过于保守, 通过修正可以提高适用性。极限分析与强度折减的计算结果较为准确, 但极限分析的破坏模式和强度折减中基坑稳定临界状态容许隆起量仍需进一步研究。

关键词: 基坑隆起; 安全系数; 极限平衡; 极限分析; 强度折减

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)03-0053-03

Comparative Study on Calculation of Safety Coefficients for Anti-heave Stability/LI Jin-suo (China Railway 18 Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Heave deformation and fracture are the common instability form of foundation pit, which is difficult to be monitored. Analysis on anti-heave stability is mainly for the calculation of safety coefficients. The main computing methods of safety coefficient of anti-heave stability include limit equilibrium, limit analysis and strength reduction. An engineering example is adopted in this paper, the above-mentioned methods are used to calculate safety coefficients for anti-heave stability, and the applicability of these 3 methods is comparatively analyzed. The results show that more engineering factors are ignored by traditional limit equilibrium algorithm with too conservative result, which can be modified to improve the applicability. The calculation results are more accurate by limit analysis and strength reduction methods, but further study is needed on failure mode of limit analysis and permitted upheaval value of foundation pit stability in critical state by strength reduction.

Key words: heave of foundation pit; safety coefficient; limit equilibrium; limit analysis; strength reduction

0 引言

我国城市建设中基坑工程极为常见, 主要包括建筑地基基坑、地铁车站基坑以及地下空间基坑等。尽管国内外对基坑工程变形控制及周边环境效应的研究已经取得大量成果, 但由于城市环境条件复杂、岩土性质的离散型及不确定性、工程勘查设计与施工不当等因素, 基坑工程事故依旧时有发生^[1], 而坑底隆起破坏是常见的一种基坑失稳形式^[2], 尤其是对于软土基坑工程。

基坑开挖的卸载效应是坑内土体隆起的主要原因^[3]。基坑坑底稳定性的研究主要可以分为基坑隆起量计算和基坑抗隆起稳定性安全系数计算2方面。

基坑失稳时一般坑底都产生了一定的隆起, 基坑施工过程中较小的隆起是允许的, 而基坑的保护等级越高, 周围环境要求越严格, 则允许隆起量就越

小。基坑隆起量的大小也成为判断基坑稳定和变形的重要依据之一^[4]。但是, 目前坑底回弹计算方法结果差异较大, 且基坑施工过程中坑底隆起监测点埋设和挖土阶段对监测点保护存在一定困难^[5], 难以实现对坑底隆起的有效监测, 因此, 目前对基坑坑底抗隆起稳定性的研究主要是安全性系数计算。

基坑抗隆起稳定性安全系数对基坑工程意义重大, 关系着基坑工程稳定安全, 也与基坑施工引起的坑内坑外变形密切相关。基坑抗隆起稳定性分析方法可以分为3大类: 传统的极限平衡法、极限分析法和基于强度折减的弹塑性有限单元法^[6]。极限平衡原理主要有2类: 地基承载力模式和圆弧滑动法, 前者有经典的 Terzaghi 公式, 后者是假定某一圆弧作为滑裂面, 通过计算滑裂面上的抗滑力矩和滑动力矩的比值得到安全系数。极限平衡是在假定破坏

收稿日期: 2014-08-29; 修回日期: 2014-10-26

作者简介: 李金锁, 男, 汉族, 1964年生, 高级工程师, 国家一级建造师, 全国优秀项目经理, 从事大型城市轨道交通、隧道及市政工程施工技术管理与科研工作, 天津市河西区柳林东, 67252890@qq.com。

面上计算,理论不够严格。极限分析法是基于塑性力学上下限定理发展起来的一种分析方法,能给出极限荷载严格的上下限^[7],不依赖于土体本构模型。此外,随着强度折减方法在边坡稳定性分析应用的推广,也有学者将该方法用于基坑抗隆起稳定性安全系数计算^[8]。

本文结合美国 San Francisco 地区一条排水沟软土基坑工程,分别采用极限平衡经验算法、极限分析解析算法、强度折减数值算法计算坑底抗隆起稳定性系数。

1 工程概况

该排水沟工程基坑深 9.2 m,宽 7.5 m,长 12 m,支护结构入土深度 4.2 m,坑底以下 2 m 范围内采用旋喷桩加固地基处理,土层物理参数如表 1 所示。

表 1 土层物理参数

土层	厚度/ m	重度/ (kN·m ⁻³)	粘聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)
杂填土	3.2	18.0	5.2	27
粘土	25.6	19.2	42.6	23
卵砾石	2.7	20.0	8.3	35
风化岩		21.0	371.5	32

2 极限平衡经验算法

运用极限平衡原理进行基坑抗隆起稳定安全系数计算,主要有滑动面破坏模式和地基承载力模式。Bjerrum 和 Eide 假设粘土基坑的稳定性由不排水抗剪强度控制,基于地基承载力模式提出的抗隆起稳定系数计算公式为:

$$F_s = N_c c_{ub} / (\gamma H + q) \quad (1)$$

式中: c_{ub} ——坑底下破坏区土的加权平均粘聚力, kPa; N_c ——稳定系数,当 $H/B < 2.5$, $N_c = 5(1 + 0.2B/L)(1 + 0.2H/B)$; $H/B > 2.5$, $N_c = 7.5(1 + 0.2B/L)$ 。

这种计算方法一般适用于柔性挡土墙,而实际基坑工程大多采用刚度较大的支挡结构。张耀东^[9]考虑围护结构入土深度、基坑底部软土深度及基底加固等因素的影响,对上述公式进行了修正:

$$F_s = [\beta N_c c_{ub} + \gamma_2 D + 2\alpha c_{udp} D(1 + B/L)/B + \alpha_p c_{udp} \pi D_p T_p N_p / (LB)] / [\gamma_1 (H + D) + q] \quad (2)$$

式中: β ——坑底下软土深度对抗隆起稳定性影响的

修正系数; γ_1 ——坑外地表至墙底各土层天然容重的加权平均值, kN/m³; γ_2 ——坑内开挖面以下至墙底各土层天然容重的加权平均值, kN/m³; D ——围护墙的入土深度, m; α ——围护墙与土体间的粘聚力修正系数,小于 1,一般可取 0.3~0.7; c_{udp} ——支护结构入土深度范围内被动区土体的加权平均粘聚力, kPa; α_p ——工程桩与土体间的粘聚力修正系数,小于 1; D_p ——工程桩的直径, m; T_p ——考虑工程桩影响的被动区土体的深度,可取围护墙入土深度 D , m; N_p ——坑内的工程桩总数。

对于前文具体工程实例,采用 Bjerrum 和 Eide 公式计算得到的安全系数为 0.721,不能满足设计要求。而采用(2)式得到的安全系数为 1.589,达到了设计要求的 1.500 的安全系数。上述计算过程中,修正系数 α 和 α_p 分别取 0.3 和 0.5。当修正系数 α 和 α_p 分别取较大值 0.7 和 1 时,计算得到的安全系数为 1.936。这说明 Bjerrum 和 Eide 公式得到的安全系数忽略的有利因素较多,计算结果过于保守,在实际使用中可能造成较大的工程浪费。而(2)式修正方法可以考虑诸多有利因素,同时可以对围护结构进行优化设计。

3 极限分析解析算法

极限分析方法在理论上比极限平衡严格。秦会来^[7]基于 Prandtl 机构运动许可速度场,应用外力功率与内能耗散率相平衡,推导了非均值软土基坑抗隆起稳定性安全系数上限解。假定坑内土体与支护墙体界面完全粗糙时,计算公式为:

$$F_s = \frac{c_u [H + 3D + (2 + \pi) \sqrt{2} T]}{\gamma H \sqrt{2} T + \sqrt{2} q T} \quad (3)$$

式中: T ——坑底土坚硬土层的埋深度; q ——坑外附加荷载; D ——支护墙体的入土深度; H ——基坑开挖深度。

考虑矩形基坑长宽比修正系数 $(1 + 0.2B/L)$, 计算上述工程实例的安全系数,结果为 1.725。

4 强度折减算法

强度折减方法最初用于二维边坡稳定性分析,一些学者逐步将其引入到基坑坑底抗隆起稳定分析问题中^[10],其原理为:将抗剪强度参数 c 和 ϕ 以试算的安全系数 F_s 进行折减, F_s 取 1 开始计算,逐渐

增加 F_s , 直到基坑坑底稳定性达到临界值。

这里采用 Flac3d 有限差分软件进行计算, 主要步骤如下。

(1) 建立数值计算模型, 如图 1 所示。根据实际土体参数, 在自重应力和附加荷载作用下达到平衡, 清除塑性区和位移, 得到初始应力场。



图 1 Flac3d 数值计算模型

(2) 根据实际工程开挖进行模拟计算。判断开挖结束后坑底隆起变形是否达到最大容许变形量。根据相关规范要求, 坑底最大隆起变形量 $\leq 0.22\% H$ 。

(3) 对不同安全系数计算得到的坑底隆起变形量进行曲线拟合分析, 如图 2 所示, 根据容许隆起量确定基坑抗隆起稳定安全系数。

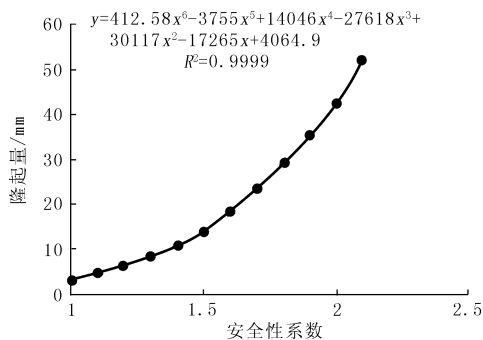


图 2 安全性系数与坑底隆起量拟合曲线

基坑开挖深度为 9.2 m, 临界隆起量为 20.2 mm, 根据拟合曲线可以求得安全系数为 1.683, 与极限分析计算结果较为接近。

这种强度折减与数值分析结合的算法, 将基坑稳定安全系数与坑底隆起变形联系起来。随着数值模型更趋合理、岩土体参数更为准确, 基坑隆起变形的计算将更符合工程实际, 因此通过这种方法计算得到的基坑安全系数较为准确。但是, 基坑隆起的临界状态根据规范确定容许隆起量 $0.22\% H$, 未考虑基坑几何形状、岩土体状态、围护结构及其他一些

基坑土体加固因素的影响, 并不能作为通用的临界状态, 临界隆起控制值需要进一步研究。

5 结论

该工程施工过程并未出现因隆起而基坑失稳的情况。本文分别采用已有的极限平衡经验算法、极限分析解析算法和强度折减方法进行了基坑抗隆起安全性系数计算, 通过对比分析, 得出如下结果。

(1) 基于极限平衡的传统的 Terzaghi 公式和 Bjerrum & Eide 公式一般适用于柔性支挡结构, 由于考虑的其他的因素较少, 不能真实反映基坑稳定性状态, 计算结果过于保守, 会造成较大的设计施工浪费。而相关学者对此进行的优化修正, 能较好考虑围护结构入土深度及坑底加固等有利因素, 计算结果更为合理。

(2) 基于极限分析的解析算法在理论上比极限平衡更为严格, 计算结果具有较强的实用性, 但滑动破坏模式选取的合理性需要进一步探讨。

(3) 强度折减与数值方法结合的稳定安全系数计算方法, 能够真实反映基坑开挖隆起变形状态, 将基坑隆起变形与稳定安全系数结合起来, 计算结果更为准确。但是基坑临界状态的容许隆起量 $0.22\% H$ 忽略了不同工程之间差异性因素的影响, 适用性较弱, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 李小青, 王朋团, 张剑. 软土基坑周围地表沉降变形计算分析[J]. 岩土力学, 2007, (9): 1879 - 1882.
- [2] 高大钊, 孙钧. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 基坑回弹的实用算法[J]. 土木工程学报, 2000, (4): 61 - 67.
- [5] 杨学林. 基坑工程设计、施工和监测中应关注的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, (11): 2327 - 2333.
- [6] 黄茂松, 王卫东, 郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报, 2012, (6): 146 - 161.
- [7] 秦会来, 黄茂松, 王卫东. 非均质软土基坑抗隆起稳定性的极限分析方法[J]. 岩土力学, 2008, (10): 2719 - 2724.
- [8] 孔德森, 门燕青, 张伟伟, 等. 软土深基坑坑底抗隆起稳定性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, (S1): 186 - 190.
- [9] 张耀东, 龚晓南. 软土基坑抗隆起稳定性计算的改进[J]. 岩土工程学报, 2006, (S1): 1378 - 1382.
- [10] Faheem H, Cai F, Ugai K. Three-dimensional Base Stability of Rectangular Excavations in Soft Soils Using FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(2): 67 - 74.