

止水帷幕对软黏土基坑抗隆起稳定性的影响分析

李 瑛, 张金红*, 刘兴旺, 陈 东, 李冰河

(浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘 要: 对深厚软黏土地区的深基坑工程, 围护桩插入比很大时也可能发生隆起失稳事故, 工程实例表明土体会从围护桩间流动。针对排桩和止水帷幕的支护结构, 采用绕止水帷幕底的圆弧滑动模式, 根据极限平衡法推导得到坑底抗隆起稳定分析公式。通过对隆起失稳基坑实例分析, 证明软黏土基坑抗隆起稳定分析不仅要考虑排桩入土深度而且要考虑止水帷幕入土深度, 作为附加要求, 建议绕止水帷幕底抗隆起稳定安全系数应大于 1.1。分析忽略了排桩对桩间软黏土的摩阻力, 结果偏于安全。

关键词: 深基坑; 止水帷幕; 抗隆起稳定; 软黏土

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)03-0029-04

作者简介: 李瑛(1985-), 男, 江西九江人, 高级工程师, 工学博士, 国家注册土木(岩土)工程师, 主要从事软黏土电渗固结、承压水突涌、绿色支护和地铁隧道保护等岩土工程设计方面的研究。E-mail: 1062560681@qq.com。

Analysis on the influence of waterproof curtain on heave-resistant stability of excavations in soft clay

LI Ying, ZHANG Jin-hong*, LIU Xing-wang, CHEN Dong, LI Bing-he

(Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: In soft clay foundation, soil may flow from the gaps between row piles during excavation, and this may cause an adverse impact on heave-resistant stability. Assuming that the soil slip failure mode was a circular around the bottom of waterproof curtain, a formula based on limit equilibrium method was deduced and adopted to analyze the heave-resistant stability of excavations. Furthermore, the influence on heave-resistant stability of excavations caused by the embedded depth of waterproof curtain was discussed. It is shown that the heave-resistant stability of excavations would overestimate the safety against basal heave when using the traditional method with the circular placed around the bottom of pile. The collapse of the excavation in Huzhou showed that the waterproof curtain was too short to resist the soft clay movement between row piles. Hence, the method in this paper can be used to calculate the embedded depth of waterproof curtain in soft clay foundation.

Key words: deep excavation; waterproof curtain; heave-resistant stability; soft clay

0 引 言

随着城市建设的迅速发展, 涌现了大量深基坑工程。在坑内卸土过程中, 坑内外土体形成竖向压力差, 在土重及地面荷载的作用下, 坑外土体向坑内移动, 坑外地表发生沉陷, 坑底产生隆起。因此, 在基坑设计中, 抗隆起稳定验算是极其重要的一环。

极限平衡分析法是较早且较为常用的抗隆起稳定理论计算方法。Terzaghi 公式和 Bjerrum-Eide

公式是最早基于地基承载力模式的极限平衡解。汪炳鉴和夏明耀^[1]基于圆弧滑动模式得出极限平衡解, 国内^[2]、日本^[3]和台湾地区^[4]的规范均是如此。基于此, 许多学者进一步分析了基坑形状、尺寸、围护墙埋深、坑底软土深度、被动区加固及基坑内工程桩等对极限平衡分析结果的影响^[5-6]。郑刚^[7]提出了考虑弧长和法向应力的修正计算方法。既有研究均假定滑裂面为以最下道支撑点(坑底)与围护墙交点为圆心、通过桩底的圆弧。

收稿日期: 2019-09-27

*通讯作者: 张金红 (E-mail: 443471538@qq.com)

对深厚软黏土地基上的深基坑,围护桩结合水平内支撑是常用围护形式,为了保证抗隆起稳定性,排桩插入深度很大,一般大于1:2,代价高昂。然而因坑底隆起发生的失稳事故仍时有发生。笔者认为与止水帷幕长度较短有关,而现有基坑抗隆起研究较少关注此。

本文假定滑动圆弧通过止水帷幕底,根据极限平衡法建立坑底抗隆起稳定分析公式,并结合工程事故案例进行参数分析。

1 分析模型

除极限平衡分析法假设外,本文增加如下假设:

- (1) 滑裂面为以最下道支撑点为圆心、通过止水帷幕底的圆弧。
- (2) 止水帷幕桩间局部抗剪满足要求。

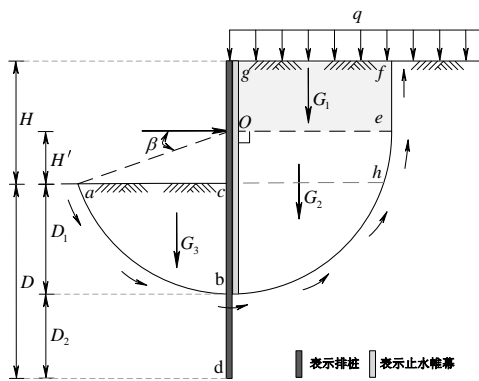


图1 圆弧滑动模式计算简图

Figure 1 Calculation schematic of circular arc sliding mode

图1中 H 为基坑开挖深度, D 为排桩入土深度, D_1 为止水帷幕入土深度, D_2 为排桩超出止水帷幕的长度, q 为坑顶地表超载, H' 为基坑最下道支撑到坑底的距离, β 是圆弧滑动面与坑底表面交点 a 和最下道支撑与支护结构交点 O 的连线与水平面的夹角,由图可知 $D = D_1 + D_2$, $\beta = \arcsin[H'/(H' + D_1)]$ 。

文献^[8-9]给出了等效均质地基模型中的简化公式,本文参考其推导过程,仅给出各滑动力矩及抗滑力矩的计算结果。本文不采用主动区 bch 区域内产生的滑动力矩和被动区 abc 区域内产生的抗滑力矩相抵消的假定,因为若安全系数不等于1,该假定会导致计算的安全系数与实际不符,故本文分别将其计入滑动力矩和抗滑力矩。

滑动力矩主要包括坑顶地表超载 q 对圆心 O 的滑动力矩、区域 $Oefg$ 及区域 $Ocbde$ 的土体自重对圆心 O 的滑动力矩,计算方法如下:

$$M_q = \frac{1}{2}q(H' + D_1)^2 \quad (1)$$

$$M_{Oefg} = \frac{1}{2}\gamma(H - H')(H' + D_1)^2 \quad (2)$$

$$M_{Ocbde} = \frac{1}{3}\gamma(H' + D_1)^3 \quad (3)$$

滑动力矩 M_s 为以上三者之和,即:

$$M_s = \frac{1}{6}[3q + 3\gamma(H - H') + 2\gamma(H' + D_1)](H' + D_1)^2 \quad (4)$$

而抗滑力矩包括滑动面 ef 、滑动面 bde 、滑动面 ab 、区域 abc 的土体自重对圆心 O 的抗滑力矩,各自计算公式如下:

$$M_{ef} = (c + qK_a \tan \varphi)(H - H')(H' + D_1) + \frac{1}{2}\gamma K_a \tan \varphi (H - H')^2 (H' + D_1) \quad (5)$$

$$M_{be} = \frac{\pi}{2}c(H' + D_1)^2 + \frac{\pi}{4}q_f \tan \varphi (H' + D_1)^2 (1 + K_a) + \frac{1}{3}\gamma \tan \varphi (H' + D_1)^3 (2 + K_a) \quad (6)$$

$$M_{ab} = \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) c (H' + D_1)^2 + \gamma (H' + D_1)^3 \tan \varphi \cos \beta \cdot \left(1 - \frac{\cos^2 \beta}{3} + \frac{\cos^2 \beta}{3} K_p \right) - \gamma (H' + D_1)^3 \sin \beta \tan \varphi \cdot \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\sin 2\beta}{4} + \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} - \frac{\sin 2\beta}{4} \right) K_p \right] \quad (7)$$

$$M_{abc} = M_{Oab} - M_{Oac} = \frac{1}{2}\gamma(H' + D_1)^3 \left(\frac{2}{3} - \sin \beta + \frac{\sin^3 \beta}{3} \right) - \frac{H'^3}{6 \tan^2 \beta} \quad (8)$$

则抗滑力矩 M_r 为:

$$M_r = M_{ef} + M_{be} + M_{ab} + M_{abc} \quad (9)$$

其中, K_a 为主动土压力系数, K_p 为被动土压力系数,为反映基坑主动侧及被动侧土体所处的真实状态^[10],取 $K_a = \tan^2(\pi/4 - \varphi/2)$ 及 $K_p = \tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$; γ , c , φ 分别为土体的重度、黏聚力和内摩擦角; q_f 为最下道支撑位置处的竖向土压力值^[10], $q_f = q + \gamma(H - H')$ 。

此时的坑底抗隆起稳定安全系数为:

$$F_s = M_r / M_s \quad (10)$$

2 案例分析

湖州某基坑工程在开挖到底后底板施工过程中发生失稳破坏,支护桩的深层水平位移曲线未见异常,最大值约30 mm,位置为坑底以下约2 m处,支撑与压顶梁连接处发生断裂,坑外地表下沉约1.5 m,坑底土体明显隆起。支护剖面如图2所示,支护结构为直径700 mm,间距1000 mm的钻孔灌

注桩结合一道混凝土内支撑, 基坑开挖深度约 5.5 m, 排桩入土深度为 21.5 m (桩底进入黏土层约 1.5 m), 止水帷幕入土深度为 5.5 m, 支撑中心线距坑底的距离为 3.6 m。地基主要为淤泥层, 基本物理力学参数为: $\gamma=16.0 \text{ kN/m}^3$, $c=6 \text{ kPa}$, $\varphi=7^\circ$ 。

按规范方法^[3]计算得抗隆起安全系数为 2.36, 满足要求; 假定地基都是淤泥层, 绕围护桩桩底计算得到的坑底抗隆起安全系数为 1.38, 仍然处于稳定状态; 但是实际基坑发生隆起破坏, 如图 3 和图 4 所示。这说明假定滑裂面为绕围护桩桩底的圆弧偏于不安全。如用本文方法, 即滑裂面为绕止水帷幕底的圆弧, 抗隆起安全系数为 0.99。实际施工过程中, 坑周超载比设计的更大, 基坑抗隆起稳定性更差。

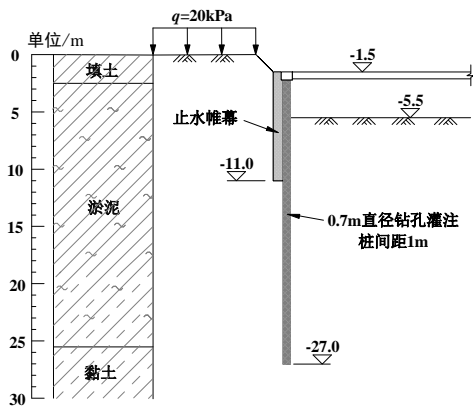


图 2 湖州某基坑土层分布与典型断面剖面图

Figure 2 Subsurface soil layers and a typical cross section of excavation in Huzhou



图 3 失稳后支撑体系破坏

Figure 3 Destruction of supporting structure and land subsidence out of foundation pit after failure

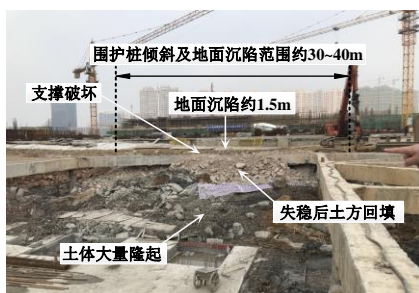


图 4 失稳后坑外地面沉降及坑内土体隆起

Figure 4 Destruction of land subsidence out of foundation pit and the base heave after failure

对湖州项目, 止水帷幕入土比与抗隆起安全系数之间的关系如图 5 所示。显然, 止水帷幕越长, 安全系数越大。按照规范^[2], 绕围护桩底的抗隆起稳定安全系数应大于 1.9。若要求绕止水帷幕底的抗隆起稳定分析安全系数达到相同要求, 即止水帷幕长度应和围护桩长度一样, 工程实践表明无此必要。作为现有规范之外的附加要求, 笔者建议绕止水帷幕底的抗隆起稳定安全系数应大于 1.1。本文分析中忽略了围护桩对桩间土的摩阻力, 结果是偏于安全。湖州失稳基坑的止水帷幕加长 2.5 m 后, 绕止水帷幕底的抗隆起稳定安全系数即大于 1.1。

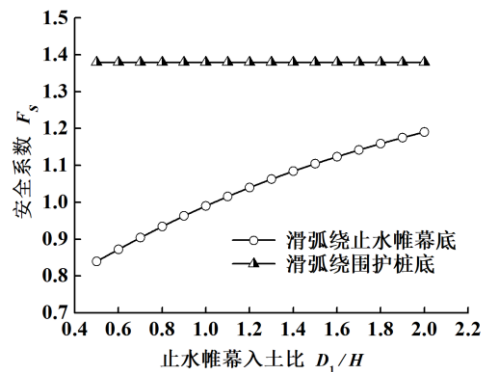


图 5 止水帷幕入土比 D_1/H 对安全系数的影响

Figure 5 Influence of D_1/H on factor of safety

上述分析建立在止水帷幕桩间局部抗剪满足要求的基础之上, 可参照规范^[11]进行验算。水泥土抗剪强度标准值可取搅拌桩 28 d 龄期无侧限抗压强度的 1/3。作用于止水帷幕计算截面处的侧向土压力取静止土压力。以直径 600 mm、间距 400 mm 水泥搅拌桩为例, 取静止土压力系数为 0.83, 结构重要性系数为 1.0, 在自地表以下距离为 z 的深度位置处的局部剪应力设计值为:

$$\tau_1 = \frac{1.25 \times 0.4 \times 0.75 \times 17 \times z}{2 \times 0.447} \leq \tau = \frac{0.5 \times 10^3}{3 \times 1.6} = 104 \text{ kPa}$$

故当 $z \leq 14.0 \text{ m}$ 时, 满足水泥土搅拌桩局部受剪要求。故本文假定水泥土搅拌桩不会局部受剪破坏是可行的。

3 结 论

针对排桩加止水帷幕的支护结构, 采用极限平衡法推导了绕止水帷幕底的圆弧滑动公式, 结合工程案例得出以下结论:

- (1) 软黏土基坑抗隆起稳定分析中不仅应考虑排桩入土深度, 而且应考虑止水帷幕入土深度。
- (2) 作为现有规范之外的附加要求, 建议绕止水帷幕底的抗隆起稳定安全系数应大于 1.1。
- (3) 本文分析忽略了围护桩对桩间土的摩阻

力,结果是偏于安全,进一步分析可考虑摩阻力的影响。

参考文献:

- [1] 汪炳鉴,夏明耀. 地下连续墙的墙体内力及入土深度问题[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 103-114.
- [2] JGJ 120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design of building foundations[S]. Tokyo, 2001.
- [4] Taiwan Geotechnical Society. Design specifications for the foundation of buildings[S]. Taipei, 2001.
- [5] 黄茂松, 杜佐龙, 宋春霞. 支护结构入土深度对黏土基坑抗隆起稳定的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1097-1103.
- [6] 王洪新. 考虑基坑形状和平面尺寸的抗隆起稳定安全系数及异形基坑的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2559-2571.
- [7] 郑刚, 程雪松. 考虑弧长和法向应力修正的基坑抗隆起稳定计算方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 781-789.
- [8] 应宏伟, 王小刚, 张金红, 等. 各向异性软黏土基坑抗隆起稳定极限平衡分析[J]. 工程力学, 2016, 33(9): 131-137.
- [9] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] 王洪新, 陈建军, 刘冀山. 基坑抗隆起稳定安全系数实用计算分析与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3223-3230.
- [11] JGJ/T 199-2010 型钢水泥土搅拌墙技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

简 讯

《土力学及基础工程实用名词词典》第二版简介

《土力学及基础工程实用名词词典》(浙江大学出版社, 1993)出版 20 多年来得到了广大读者的欢迎。20 多年来我国土木工程建设快速发展, 对外交流日益增多, 不少设计、施工技术人员承担域外工程。近年来, 不少读者希望词典能够再版。为了适应需要, 在第一版的基础上组织编写了第二版。第二版对第一版收编的词条进行了修订、补充、完善, 收编的汉语词条从 723 条扩展到 1106 条。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版)收录了土力学及基础工程领域的常用词条和相应的英文词条。词条释文力求正确、简明、全面, 并尽可能包括设计、施工所需资料。词条索引共有 3 种: (1) 词条分类检字索引; (2) 词条拼音检字索引; (3) 词条英文检字索引。查阅方便。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版)内容分 30 个部分, 分别为: (1) 综合类; (2) 工程地质及勘察; (3) 岩土分类; (4) 室内试验; (5) 原位测试; (6) 土的物理性质; (7) 渗透性和渗流; (8) 应力; (9) 位移和变形; (10) 固结; (11) 抗剪强度; (12) 本构模型; (13) 岩土动力性质;

(14) 地基承载力; (15) 地基处理; (16) 浅基础; (17) 复合地基; (18) 桩基础; (19) 特种基础; (20) 土坡稳定; (21) 挡土结构和喷锚结构; (22) 堤与坝; (23) 土压力; (24) 基坑工程与降水; (25) 地下工程; (26) 动力机器基础; (27) 地基基础抗震; (28) 土工合成材料; (29) 环境岩土工程; (30) 其他。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版)主编龚晓南, 副主编谢康和。罗勇博士、连峰博士、李瑛博士、王志达博士、沈扬博士、郭彪博士、吕文志博士、张杰博士、陈东霞博士、史海莹博士、张磊博士、张雪婵博士、黄大中博士等在浙江大学学习期间参与了本词典词条的遴选、编写和校对工作。本词典在编写过程中还得到了浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心同事们的大力支持, 陆水琴和王笑笑等同志为本词典的排版、校对等做了许多工作, 在此表示感谢。

由于编者水平有限, 本词典中难免有错误和不当之处, 敬请读者批评指正。

龚晓南