

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0247

考虑假想基础宽度的基坑抗隆起稳定性

李 瑛¹, 刘岸军², 刘兴旺¹

(1. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006; 2. 杭州天元建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311202)

摘 要: 在深厚软土地区, 有大量的基坑工程符合下列特征: (1) 围护墙插入比为 1:2.0~1:2.2; (2) 开挖过程顺利; (3) 抗隆起安全系数不满足现行相关标准要求。为减少理论与实践之间的不符, 基于既有地基承载力模式的计算公式, 通过引入假想基础宽度, 建立了可考虑土体应力状态和抗剪能力的基坑抗隆起稳定性分析方法。定义了抗隆起安全系数在数学上为最小值的假想基础宽度为临界宽度。除临界宽度外, 假想基础宽度的选取还应考虑基坑宽度、软土层厚度等因素。结合已完成工程实例, 对比了现有不同稳定分析方法的抗隆起安全系数, 分析了软土地层结构、土体内摩擦角等对稳定性的影响。分析结果与实际情况更加接近, 且表明土体抗剪能力的影响在采用临界宽度作为假想基础宽度时有限。

关 键 词: 抗隆起稳定性; 深基坑; 软黏土; 假想基础宽度; 承载力; 基坑宽度

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 10-2843-08

Basal heave stability of deep excavation considering virtual foundation width

LI Ying¹, LIU An-jun², LIU Xing-wang¹

(1. Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310006, China;

2. Hangzhou Tianyuan Architectural Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311202, China)

Abstract: In the area of deep soft soil, there are a large number of deep foundation pits conforming to the following characteristics: (1) insertion ratio of retaining wall is between 1:2.0 and 1:2.2; (2) excavation process goes smoothly; (3) basal heave stability does not meet the requirements of relevant standards. In order to reduce the inconsistency between theory and practice, based on the calculation formula of the existed foundation bearing capacity model, a basal heave stability analysis method for foundation pit considering soil stress state and shear capacity was developed by introducing the virtual foundation width. The critical width was defined as the virtual foundation width with the minimal basal heave stability in mathematics. In addition to the critical width, the width of the foundation pit and the thickness of the soft soil layer should also be considered in the selection of the virtual foundation width. A completed engineering example was given to compare the basal heave stabilities of the existed different analysis methods, and to analyze the influence of soft soil layer structure and internal friction angle on stability. The analysis results were closer to the actual situation, and showed that the influence of soil shear capacity was limited when the critical width was used as the virtual foundation width.

Keywords: basal heave stability; deep excavation; soft clay; virtual foundation width; bearing capacity; foundation pit width

1 引 言

我国沿海地区经济发达, 地下空间开发利用广泛, 基坑安全至关重要。而且沿海多地分布深厚软弱黏土层, 如上海、温州、泉州等地, 不利于基坑安全控制。按国内现行设计标准, 为使基坑稳定性满足要求, 围护墙应穿透深厚软土层并进入其下物理力学性质相对较好的“硬土层”一定长度。这对开

挖深度约 5 m 而软土层厚度超过 35 m 的基坑工程难以接受。有些软土地区的地方经验表明, 围护墙插入比 (基坑开挖深度与围护墙插入长度之比) 控制在 1:2.0~1:2.2 即可保证顺利开挖, 尽管多项稳定性系数未达到相关标准要求。

围护墙插入比与深基坑的整体稳定性、抗倾覆稳定性、坑底抗隆起稳定性、墙底抗隆起稳定性等有关, 而且抗隆起稳定性对保证基坑安全和控制基

收稿日期: 2023-02-28

录用日期: 2023-05-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52078466); 浙江省建设科研项目 (No.2019K002, No.2019K003, No.2020K110)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52078466) and the Zhejiang Province Construction Research Project (2019K002, 2019K003, 2020K110).

第一作者简介: 李瑛, 男, 1985 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程设计、咨询和研究工作。E-mail: liying3104@163.com

通讯作者: 刘岸军, 男, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事结构工程和岩土工程的设计与咨询工作。E-mail: 41869700@qq.com

坑变形具有重要意义,国内外对此极为重视^[1]。常用的基坑抗隆起稳定分析方法包括极限平衡法、极限分析法和数值计算方法。

极限平衡法因其简单的理论基础与方便的计算公式而在工程广泛应用。Terzaghi^[2]提出了基于承载力模式的极限平衡方法,但未考虑围护墙插入长度,适用于浅基坑或窄基坑。Bjerrum 等^[3]考虑了挡土构件嵌入长度较大且不会破坏时的墙底抗隆起稳定性分析。汪炳鉴等^[4]提出了可考虑土体抗剪强度指标和围护墙插入长度的抗隆起稳定分析方法,该方法计算简便,被我国建筑行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[5]采用,广泛应用于国内深基坑工程,但是该方法不能考虑基坑平面尺寸的影响,忽略了滑动土体竖向抗剪力的作用。上述方法都是按坑壁土体的滑坡失稳或地基承载力验算的思路推导出来的,现行国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[5]、上海市标准《基坑工程技术规范》(DG/TJ 08—61—2010)^[6]、浙江省标准《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014)^[7]等均采用基于 Prandtl 公式的地基承载力公式验算墙底抗隆起稳定性。已有研究表明,用 Prandtl 公式计算墙底抗隆起稳定性的主要缺陷是忽略了假想基础宽度(滑动土体宽度),进而不能考虑窄基坑的有利作用,而且因为忽略基础埋置深度导致计算结果偏小。王洪新^[8-9]改进了墙底抗隆起稳定计算方法以考虑基坑宽度的影响。王成华等^[10]给出了均质地基的临界宽度的理论解答,考虑了单面滑动粗糙基底抗隆起承载力,并对影响基坑抗隆起稳定问题的因素进行了参数分析。童磊等^[11]收集了浙江地区大量软弱土基坑工程实例,并考虑坑内上覆土抗剪强度对基坑抗隆起稳定性的有利作用,但其物理意义不明确。阳吉宝^[12]依据极限平衡计算原理建立了可考虑坑内外两侧土体抗剪强度作用的计算模式,但其假想基础宽度基于经验和最大主应力剪裂角,其适用性需要研究。除此之外,现有计算方法不能考虑软土地层结构,如软土层厚度有限、地表分布性质相对较好的“硬壳层”、坑底以下为有限厚度的粉砂土等。

极限分析法基于塑性理论,能给出极限荷载的上下限,近年在简化分析方法推导有所应用。黄茂松等^[13]根据强度折减弹塑性有限元分析结果,对 Prandtl 机构进行修正,推导了符合极限分析上限定理的修正机构简化解,可考虑坑底软土层厚度和基坑宽度对坑底抗隆起稳定性的影响。该方法在采用多块体上限法^[14]和基于块体剪流组合机构的上限

分析方法^[15]优化后,适用范围更大,计算结果更优。但是该法适合饱和软黏土基坑,且不能考虑土体应力状态。

本文以既有地基承载力模式的抗隆起稳定计算方法为基础,引入假想基础宽度以考虑坑内和坑外潜在滑动面上土体抗剪力,并对假想基础宽度的取值进行分析,建立可考虑基坑内外土体竖向抗剪力、基坑宽度、软土层厚度等因素的基坑抗隆起稳定性分析方法,并通过工程案例的参数分析来探讨与现有方法的区别。

2 抗隆起稳定分析

地基承载力模式的抗隆起稳定分析方法是以验算围护墙底面的地基承载力作为抗隆起分析依据。汪炳鉴等^[4]参照 Prandtl 和 Terzaghi 的地基承载力公式,将墙底平面作为求极限承载力的基准面,滑动面形状如图 1 所示,并建议按式(1)进行抗隆起安全系数 K_s 的验算,以求得围护墙的插入长度 t 。

$$K_s = \frac{\gamma_p t N_q + c N_c}{\gamma_a (h+t) + q_0} \quad (1)$$

$$N_q = \frac{e^{\left(\frac{3}{2}\pi - \varphi\right)\tan\varphi}}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2)$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan\varphi \quad (3)$$

式中: γ_a 和 γ_p 分别为基坑外侧、基坑内侧围护墙底以上土的天然重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$),对多层土取各层土按厚度加权的平均值; N_q 、 N_c 分别为地基极限承载力系数,可查表获得或用相关公式计算,如用 Terzaghi 公式则分别为式(2)和式(3); h 为基坑开挖深度 (m); t 为围护墙的插入长度 (m); q_0 为基坑坑外地面超载 (kPa); c 、 φ 分别为围护墙底土体的黏聚力 (kPa) 和内摩擦角 ($^\circ$)。

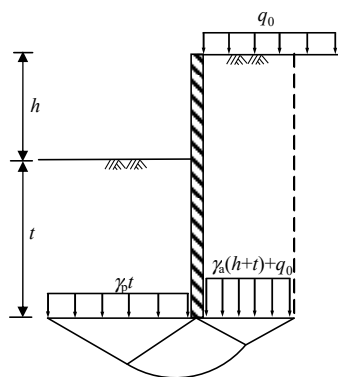


图 1 墙底抗隆起稳定分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of basal heave stability

如前所述, 式 (1) 因被现行国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012) [5] 采用, 应用广泛, 实践经验丰富。正如汪炳鉴等 [4] 所言, 由于没有考虑围护墙底以上土体抗剪强度的有利作用, 且分子部分没有考虑 Terzaghi 极限承载力公式的宽度项, 式 (1) 偏于安全。而忽略宽度项的原因主要在于假想基础宽度难以确定。

为考虑假想基础宽度的作用, 王成华等 [10] 从双侧滑动面条件下的 Terzaghi 承载力推导出发, 对于图 2 所示的土体单侧隆起滑动的情况, 假想围护墙后某一宽度范围土体为假想基础, 且假想基础底标高同围护墙底标高, 根据假想基础底部三角形弹性楔体的极限平衡条件, 得到墙底单侧抗隆起的极限承载力计算公式。假定基础埋深范围内的坑外竖向滑动面上的抗剪力共同起到抗隆起作用, 则考虑假想基础宽度的抗隆起安全系数 K_w 定义为

$$K_w = \frac{\left(cN_{lc} + \gamma_p t N_{lq} + \frac{1}{2} \gamma_p B N_{ly} \right) B + T_a}{\left[\gamma_a (h+t) + q_0 \right] B} \quad (4)$$

式中: T_a 为坑外潜在滑动体侧面的竖向抗剪力 (kN/m); B 为假想基础宽度 (m), 即坑外潜在滑动体的宽度; N_{lq} 、 N_{lc} 、 N_{ly} 均为地基极限承载力系数, 可用式 (5) ~ (7) 计算。

$$N_{lq} = \frac{1}{2} N_q + \frac{1}{2 \cos \varphi} \quad (5)$$

$$N_{lc} = \frac{1}{2} N_c + \frac{1}{2} \tan \varphi \quad (6)$$

$$N_{ly} = \frac{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)}{4 \cos^2 \varphi} \tan \varphi - \frac{1}{2} \tan \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \left(\frac{\gamma_a h + q_0}{\gamma_a B} \right) + \frac{1}{4 \cos^2 \varphi} \quad (7)$$

对于深厚软土地层, 围护墙插入长度通常较大, 抗隆起稳定分析不应忽略基坑内侧潜在滑动体侧面的竖向抗剪力 T_p 。当坑底存在物理力学性质相对较好的土层时, T_p 也不应忽略。

假定潜在滑动面为竖直面; 坑外潜在滑动面上水平土压力介于主动土压力和静止土压力之间, 并用 $\gamma z \tan^2(\pi/4 - \varphi/2)$ 计算, 相比朗肯主动土压力公式增加了 $2c \tan(\pi/4 - \varphi/2)$; 坑内潜在滑动面上水平土压力介于静止土压力和被动土压力之间, 并用 $\gamma z \tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$ 计算, 相比朗肯被动土压力公式减小了 $2c \tan(\pi/4 + \varphi/2)$ 。于是有

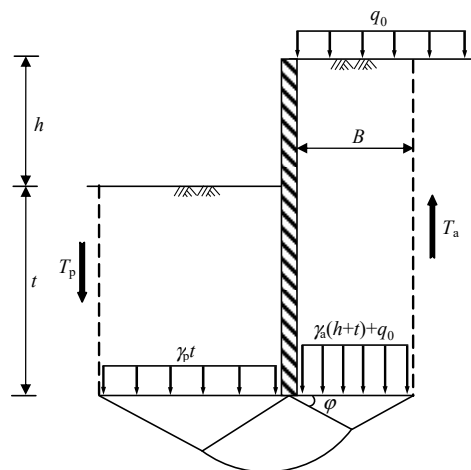


图 2 考虑土体抗剪强度的抗隆起分析示意图
Fig.2 Schematic diagram of basal heave stability considering soil shear strength

$$T_a = \int_0^{h+t} \left[\gamma_a z \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi + c \right] dz \quad (8)$$

$$T_p = \int_0^t \left[\gamma_p z \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi + c \right] dz \quad (9)$$

式中: z 为围护墙长度范围内某计算深度 (m)。随着计算深度 z 的增大, 简化计算值与朗肯土压力公式计算值的比值趋近于 1.0。

令

$$Q = \gamma_a (h+t) + q_0 \quad (10)$$

将式 (5) ~ (9) 代入式 (4), 经整理, 并定义考虑坑内抗剪力和坑外抗剪力的抗隆起安全系数为 K_B , 有

$$K_B = \frac{\gamma_p J B}{Q} + \frac{P}{Q} + \frac{T_a + T_p}{Q B} \quad (11)$$

其中,

$$J = \frac{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi + 1 - \sin 2\varphi}{8 \cos^2 \varphi} \quad (12)$$

$$P = c N_{lc} + \gamma_p t N_{lq} + \frac{\gamma_p}{2 \cos \varphi} \left(h + \frac{q_0}{\gamma_a} \right) \quad (13)$$

3 假想基础宽度的确定

3.1 临界宽度

对式 (11) 仅从数学上进行分析, 随着 B 增大, K_B 先减小再增大, 即存在最小值, 对应的假想基础宽度为临界宽度 B_{cr} 。根据极值处导数为 0, 经求导和代数运算得

$$B_{cr} = \sqrt{(T_a + T_p) / \gamma_p J} \quad (14)$$

结合式 (8)、(9)、(11), 临界宽度 B_{cr} 与土体重度、抗剪强度指标、基坑开挖深度和围护墙插入长度等因素有关。对于饱和软黏土地基, 土体内摩擦角为 0° , 根据式 (14), 临界宽度 B_{cr} 不为 0。

假设某基坑工程项目甲处于均质地基, $\gamma_a = \gamma_p = 17.0 \text{ kN/m}^3$, $c = 13.6 \text{ kPa}$, $\varphi = 6^\circ$, 开挖深度 h 为 10 m。如图 3 所示, 临界宽度 B_{cr} 仅与围护墙插入长度有关, 两者近似呈线性关系, 插入长度越大则临界宽度越大。而且随着插入长度的增大, K_B 和 K_s 都不断增大, 增长速率均先大后小。由于考虑了土体抗剪强度, 在图表计算范围, K_B 始终大于 K_s , 但是两者的差距随着插入长度增大而减小, 可假想在围护墙插入长度足够大时两者基本相等且均趋于固定值, 意味着这两种方法都需要完善, 可进一步考虑基坑宽度和软土层厚度的影响。

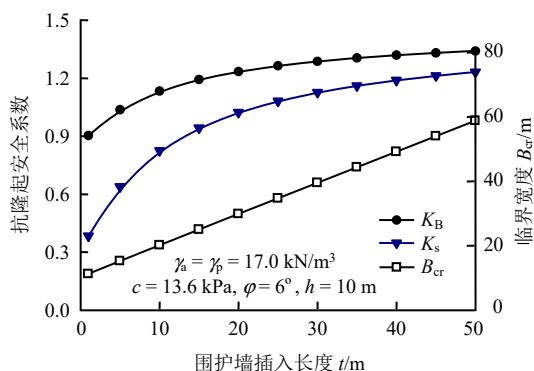


图 3 围护墙插入长度与临界宽度的关系

Fig.3 Relationship between retaining wall inserting length and critical width

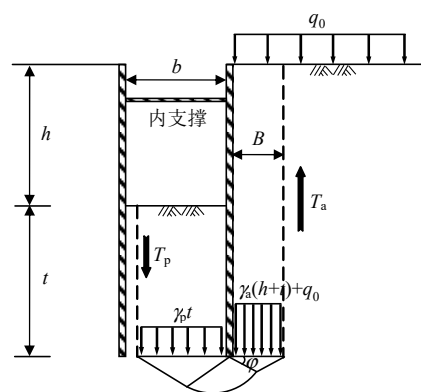
3.2 基坑宽度的影响

如前所述, 围护墙插入长度越大, 用于抗隆起稳定分析的临界宽度越大。而根据 Terzaghi 构建的基底完全粗糙的地基承载力理想影响区图形^[16], 假想基础底部为弹性区, 基坑底部为塑性区, 两者之间的过渡区近似用对数螺旋线描述。那么, 假想基础宽度越大, 塑性区宽度越大。定义塑性区宽度等于基坑宽度时的弹性区宽度 (假想基础宽度) 为 B_b , 可得其与基坑宽度 b 的关系为

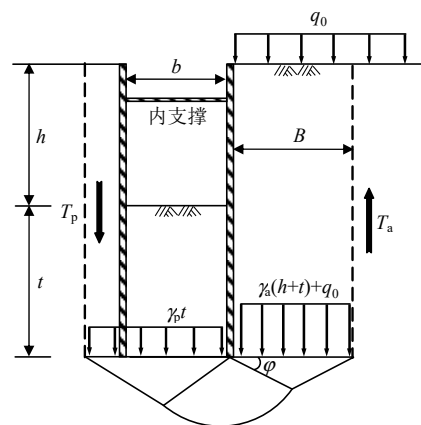
$$B_b = \frac{b \cos \varphi}{\cos \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right) e^{\left(\frac{3\pi - \varphi}{4} \right) \tan \varphi}} \quad (15)$$

对开挖深度和围护墙长度确定的基坑工程, 抗隆起稳定分析的临界宽度已确定。当基坑宽度大于

临界宽度对应的塑性区宽度时, 如图 4(a)所示, 应采用临界宽度 B_{cr} 计算抗隆起安全系数, 因为此时安全系数最小。而当基坑宽度小于临界宽度对应的塑性区宽度时, 如图 4(b)所示, 式 (11) 和图 2 表示的稳定分析模型不成立, 不仅被动区土体潜在滑动面高度由围护墙插入长度增大到围护墙长度, 而且塑性区上覆土体应考虑基坑另一侧主动区土体, 即此时临界宽度 B_{cr} 对应的稳定模型不是最危险, 应采用 B_b 计算抗隆起安全系数。



(a) 塑性区宽度小于基坑宽度



(b) 塑性区宽度大于基坑宽度

图 4 考虑基坑宽度的抗隆起分析示意图

Fig.4 Schematic diagram of basal heave stability considering pit width

上述分析可采用图 5 做进一步说明; 曲线段①、②和③根据前文项目甲的参数和式 (11) 计算, 分析时围护墙插入长度 t 为 20 m, 纵坐标为计算结果, 横坐标未保留数字; 曲线段④和⑤仅作规律示意。当不考虑基坑宽度, 曲线为①+②+③, 抗隆起安全系数 K_B 在临界宽度 B_{cr} 最小, 故计算宽度取 B_{cr} ; 当 $B_b < B_{cr}$ 时, 曲线为①+④, 抗隆起安全系数 K_B 不是在临界宽度 B_{cr} 最小, 而是在 B_b 最小, 故计算宽度取 B_b ; 当 $B_b > B_{cr}$ 时, 曲线为①+②+⑤, 抗隆起安全

系数 K_B 在临界宽度 B_{cr} 最小, 故计算宽度取 B_{cr} 。即考虑基坑宽度对抗隆起稳定的影响时, 计算宽度取 B_b 和 B_{cr} 之间的较小者。

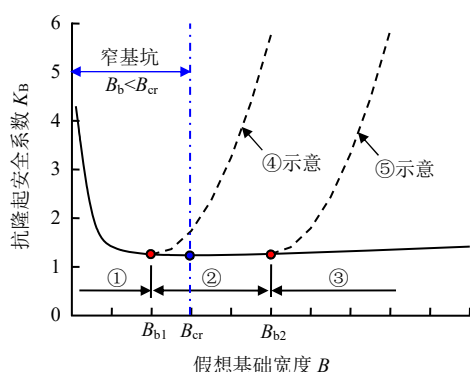


图 5 不同宽度基坑的假想基础宽度

Fig.5 Virtual foundation widths for different pit widths

而对开挖深度和平面尺寸确定的基坑工程, 随着围护墙插入长度的增大, 抗隆起稳定分析的临界宽度 B_{cr} 不断增大。临界宽度对应的塑性区宽度小于基坑宽度时, 即 $B_{cr} < B_b$ 时, 应采用临界宽度 B_{cr} 计算抗隆起安全系数, 对应的安全系数最小。临界宽度对应的塑性区宽度大于基坑宽度时, 即 $B_{cr} > B_b$ 时, 临界宽度 B_{cr} 对应的稳定模型不是最危险, 故应采用 B_b 作为假想基础宽度计算抗隆起安全系数。

对 $B_{cr} > B_b$ 的基坑工程, 尽管围护墙插入长度按前者更加安全, 但是按式 (11) 采用后者的计算结果更大, 经济性更好, 而且 B_b 越小抗隆起安全系数越大。这说明对窄基坑工程, 考虑基坑宽度影响后抗隆起安全系数比现有计算方法大, 或者保持同样的安全系数可缩短围护墙插入长度, 即能够利用空间效应。

由此出发, 可按 $B_b < B_{cr}$ 界定窄基坑的宽度, 即

$$b < \alpha \sqrt{8(T_a + T_p) / \gamma_p} \quad (16)$$

其中,

$$\alpha = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) e^{\left(\frac{3}{4}\pi - \frac{\varphi}{2}\right) \tan \varphi}}{\sqrt{\tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \tan \varphi + 1 - \sin 2\varphi}} \quad (17)$$

式 (17) 说明窄基坑的界定宽度与基坑开挖深度、围护墙插入比、土体重度和抗剪强度指标等有关。

3.3 软土层厚度的影响

在深厚软土地区, 围护墙长度的选择有时是个

两难的问题, 如插入比已经达到 1:2 而墙底与软土层底仅有 3 m。围护墙穿透软土层对基坑抗隆起更有利, 但会增加造价。如图 6 所示, 软土层厚度有限时, 随着围护墙插入长度的增加, 墙底与软土层底的距离 d 不断减小, 抗隆起稳定分析的临界宽度和地基承载力影响区高度也在增大。

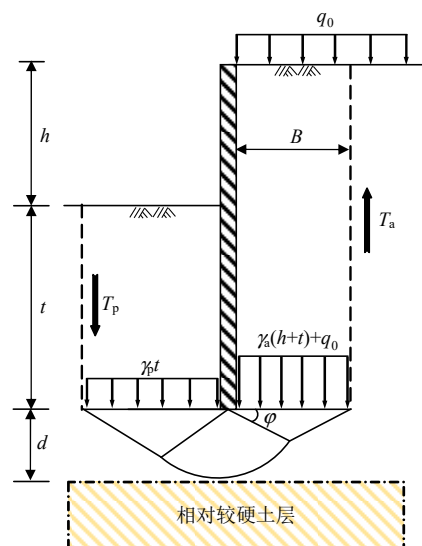


图 6 考虑软土层厚度的抗隆起分析示意图

Fig.6 Schematic diagram of basal heave stability considering soft clay layer thickness

定义地基承载力影响区高度等于墙底与软土层底高度时的地基承载力假想基础宽度为 B_d , 其与 d 的关系为

$$B_d = 2d / e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi} \quad (18)$$

若临界宽度对应的地基承载力影响区高度小于 d , 即 $B_{cr} < B_d$, 则假想基础宽度取临界宽度 B_{cr} 。而若临界宽度对应的地基承载力影响区高度大于 d , 即 $B_{cr} > B_d$, 则需做进一步分析, 且分为两种情况。第 1 种情况是地基承载力影响区可在相对较硬土层发展, 则抗隆起稳定分析与受基坑宽度影响的分析类似, 前者为塑性区在竖直方向的发展, 后者为在水平方向的发展。地基承载力计算宽度取 B_d 和 B_{cr} 之间的较小者。若软土下伏土层足够坚硬, 以致地基承载力影响区不能扩展, 则假想基础宽度只能取为 B_d 。以上分析说明, 考虑软土层厚度对抗隆起稳定的影响时, 计算宽度取 B_d 和 B_{cr} 之间的较小者。

由此出发, 可按 $B_d < B_{cr}$ 界定有限软土厚度, 即

$$d < \beta \sqrt{2(T_a + T_p) / \gamma_p} \quad (19)$$

其中,

$$\beta = \frac{e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi} \cos \varphi}{\sqrt{\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi + 1 - \sin 2\varphi}} \quad (20)$$

式(20)说明软土层的有限厚度界定与基坑开挖深度、围护墙插入比、土体重度和抗剪强度指标等有关。

3.4 假想基础宽度的确定

以上分析表明, 基坑宽度和软土层厚度对抗隆起稳定分析的影响, 发生于 $B_b < B_{cr}$ 或者 $B_d < B_{cr}$ 。如其中一者大于临界宽度, 则只需要考虑另一者对抗隆起稳定分析的影响; 如两者皆大于临界宽度, 则不需要考虑它们的影响; 对于两者都小于临界宽度的情况, 可偏于保守地取较大者进行计算。即用于抗隆起稳定分析的假想基础宽度 B 取值原则如下:

① $B_{cr} < B_d$ 且 $B_{cr} < B_b$, $B = B_{cr}$; ② $B_{cr} < B_d$ 且 $B_{cr} > B_b$, $B = B_b$; ③ $B_{cr} > B_d$ 且 $B_{cr} < B_b$, $B = B_d$; ④ $B_{cr} > B_d$ 且 $B_{cr} > B_b$, $B = \max\{B_b, B_d\}$ 。

4 案例分析

杭州市萧山区民营经济发展中心项目设整体两层地下室, 基坑普遍开挖深度约 10 m。基坑平面近似为长方形, 长边约为 121 m, 短边约为 88 m。项目周边环境复杂, 坑周荷载按 30 kPa。基坑支护方案为大直径钻孔灌注桩结合两道钢筋混凝土水平内支撑, 如图 7 所示, 围护墙的插入长度为 18.0 m, 即插入比约 1:1.8。地下室结构已于 2021 年底顺序施工完成, 基坑变形良好, 坑周土体深层水平位移最大值约为 35 mm。

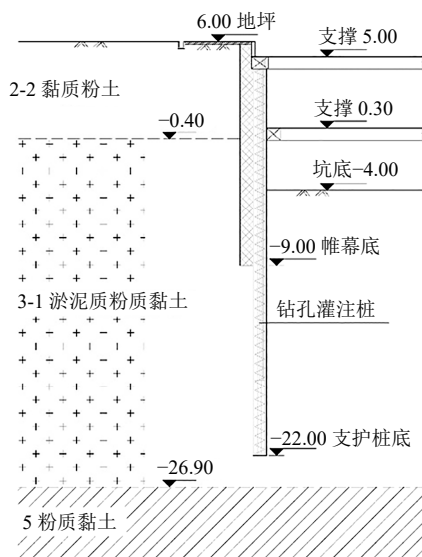


图 7 基坑支护剖面 (单位: m)

Fig.7 Section of retaining structure(unit: m)

场地土层从地面往下依次为 1 层松散的杂填土、2-1 层软塑的粉质黏土、2-2 层松散~稍密的黏质粉土、3-1 层饱和和流塑的淤泥质粉质黏土、3-2 层饱和和流塑的淤泥质粉质黏土、5 层软塑的粉质黏土。上述土层的主要物理力学参数列于表 1, 黏聚力和内摩擦角为固结快剪试验曲线的峰值。杂填土的指标为当地经验值。5 层土以下为圆砾和基岩。总体而言, 地层呈现“三明治”结构, 浅部和深部为性质相对较好的土层, 中部为性质相对较差的淤泥质土。

表 1 土层主要物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

层号	厚度 /m	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	孔隙比	含水率 /%
1	1.8	18.0	8.0	10.0	—	—
2-1	2.3	18.3	23.5	11.8	0.936	32.4
2-2	2.3	18.3	15.0	22.0	0.900	31.4
3-1	10.2	17.0	13.6	6.0	1.283	44.7
3-2	16.3	17.2	13.6	6.6	1.191	41.2
5	18.0	17.7	24.0	11.9	1.048	35.5

为了方便进行参数分析, 将地基简化成如图 7 所示地层。由基护支护信息, 可求得 $B_{cr} = 28.7 \text{ m}$; 由基坑宽度 $b = 88 \text{ m}$, 可求得 $B_b = 92.4 \text{ m}$; 由围护墙底与软土层底的距离 $d = 4.9 \text{ m}$, 可求得 $B_d = 8.3 \text{ m}$ 。根据 2.4 节的分析, 本项目抗隆起稳定分析不受基坑宽度的影响, 受软土层厚度影响, 分析结果如图 8 所示。

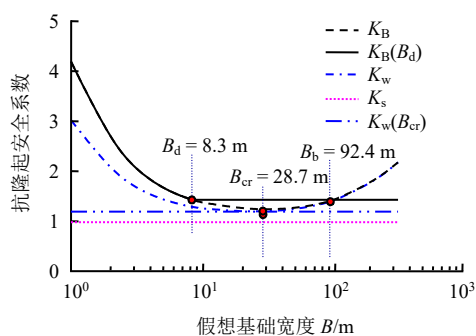


图 8 不同方法的抗隆起安全系数对比

Fig.8 Comparison of safety factors of basal heave stability by different equations

由图 8 可知, 本文公式随假想基础宽度的变化规律, 与王成华等^[10]公式大体相同; 在假想基础宽度较小时有差异, 主要在于本文公式不仅考虑了坑外侧土体抗剪力, 而且考虑了坑内侧土体抗剪力; 随着假想基础宽度增大, 两种公式的计算结果趋于相等。在计算抗隆起安全系数时, 王成华等^[10]公式取临界宽度, 因此结果为定值; 汪炳鉴等^[4]未考虑假想基础宽度的影响, 结果亦为定值; 两者的差异

在于土体抗剪强度。本文公式考虑了软土层厚度的影响, 安全系数较王成华和汪炳鉴的大, 且安全系数先减小再保持不变, 变化点在假想基础宽度等于 B_b 时。

图 9 对比分析了 2-2 层黏质粉土厚度对临界宽度和抗隆起安全系数的影响, 未考虑基坑宽度和软土层厚度的影响。随着黏质粉土层厚度的增加, 基坑外侧土体抗剪力或内侧土体抗剪力逐渐增大, 使得临界宽度不断增大, 但是抗隆起安全系数没有明显提高。

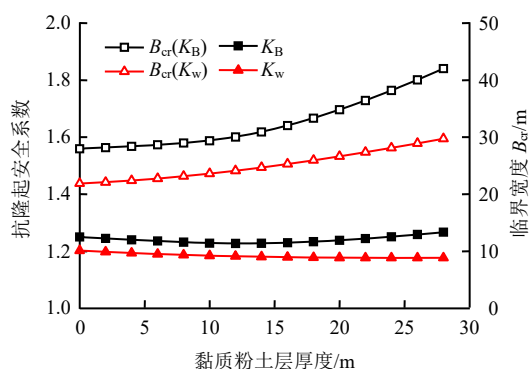


图 9 黏质粉土层厚度与抗隆起安全系数的关系
Fig.9 Relationship between thickness of clayey silt and safety factor of basal heave stability

由于黏质粉土层厚度的影响较小, 图 10 在分析 3-1 层淤泥质粉质黏土内摩擦角对抗隆起稳定分析的影响时将地基作为均质地基。抗隆起稳定分析采用临界宽度, 未考虑软土层厚度的影响。随着内摩擦角的增大, 临界宽度和安全系数均不断增大。当内摩擦角小于 6.5° 时, $K_s < K_B$; 当内摩擦角大于 6.5° 后, $K_s > K_B$, 且两者差距越来越大。这说明本文方法对内摩擦角很小的土体提高了抗隆起安全系数, 而对内摩擦角较大的土体降低了抗隆起安全系数, 与工程需要相吻合。

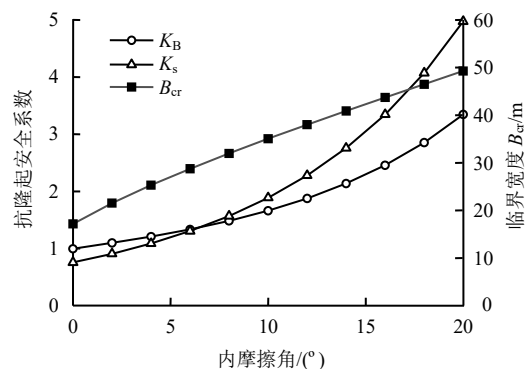


图 10 内摩擦角与抗隆起安全系数的关系
Fig.10 Relationship between internal friction angle and safety factor of basal heave stability

根据式 (11), 考虑假想基础宽度的抗隆起安全系数由 3 项组成, 且第 3 项反映土体抗剪力的作用。图 11 所示为不同内摩擦角时抗隆起安全系数的组成, 在用临界宽度计算时, 土体抗剪力对安全系数的贡献较小, 在工程精度范围可忽略。虽然在抗隆起稳定分析中引入假想基础宽度的目的是考虑潜在滑动土体抗剪力的有利作用, 但是对本案例而言抗剪力的影响有限, 可不考虑。

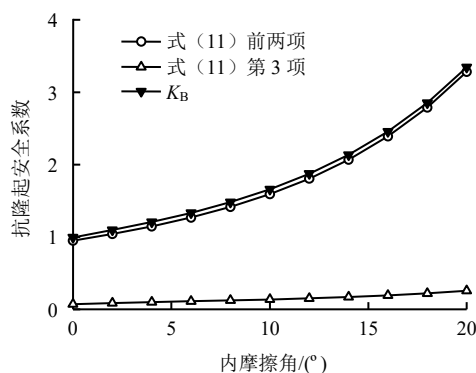


图 11 不同内摩擦角时抗隆起安全系数的组成
Fig.11 Composition of safety factor of basal heave stability for different internal friction angles

5 讨 论

为了控制软土基坑围护墙的内力和变形, 基坑底一般会设置被动区加固。被动区加固可由水泥搅拌桩、高压旋喷桩等工艺形成。加固深度一般为底板底面以下 4 m 左右, 加固宽度一般为围护墙内侧 5 m 左右, 并要求被动区加固与围护墙紧贴。当基坑宽度较小时, 如市政管廊基坑、地铁车站基坑等, 被动区加固一般会采用坑底满堂加固的形式。被动区加固应用广泛, 但其实际功效一直以来颇有争议。

根据式 (11), 由于可以考虑基坑内侧潜在滑动面上抗剪力, 在坑底满堂加固时, 本文方法给出的抗隆起安全系数会高于现有方法。但是根据图 9, 如采用临界宽度作为假想基础宽度, 被动区加固的作用有限。这似乎与工程经验不符, 因为采用满堂加固的窄基坑的围护墙长度通常可以更短。其原因是基坑宽度对坑底抗隆起稳定性的影响更大, 假想基础宽度应取 B_b , 如图 5 所示。

类似情况是坑底与下伏软土层顶面之间分布一定厚度的物理力学性质相对较好土层, 如杭州钱塘江南岸地区, 地表以下分布厚度约为 15 m 的粉砂土, 如基坑开挖深度为 10 m, 则坑底以下有 5 m 厚的粉砂土, 相当于坑底满堂加固。当假想基础宽度取临界宽度时, 土体抗剪力的作用有限, 故一般

情况坑底粉砂土层不会明显提高坑底抗隆起安全系数。

6 结 论

(1) 基于地基承载力的抗隆起稳定分析可借助假想基础宽度修正合理考虑土体抗剪力、基坑宽度、软土层厚度等因素的有利作用。

(2) 假想基础宽度选取应综合考虑安全系数最小值对应的临界宽度、窄基坑宽度和有限软土厚度；假想基础宽度采用临界宽度时，土体抗剪力的有利作用有限。

(3) 窄基坑宽度和有限软土厚度可按抗隆起稳定分析的临界宽度界定，与基坑开挖深度、围护墙插入比、土体重度和抗剪强度指标等有关。

(4) 深基坑安全与多种稳定模式的稳定性有关，本文研究结果应用时还应结合其他安全系数。

参 考 文 献

- [1] 黄茂松, 秦会来. 基坑抗隆起稳定分析的现状与进展[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 182-186.
HUANG Mao-song, QIN Hui-lai. Basal stability analysis methods for braced foundation pit[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(Suppl.1): 182-186.
- [2] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [3] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavation in clay[J]. **Geotechnique**, 1956, 6: 115-128.
- [4] 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.
WANG Bing-jian, XIA Ming-yao. Internal force and depth of underground continuous wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 5(3): 103-114.
- [5] 中国建筑科学研究院. 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.
China Academy of Building Research. JGJ 120—2012 Technical Specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [6] 上海市勘察行业协会. DGTJ 08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2010.
Shanghai Exploration & Design Trade Association. DG/TJ 08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Commission of Urban and Rural Construction and Communications, 2010.
- [7] 浙江省建筑设计研究院. DB33/T 1096—2014 建筑基坑工程技术规程[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2014.
Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research. DB33/T 1096—2014 Technical specification for building foundation excavation engineering[S]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University Press, 2014.
- [8] 王洪新. 对基坑抗隆起稳定安全系数的改进[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 30-36.
WANG Hong-xin. Improvement on safety coefficient of heave-resistant stability of excavations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.2): 30-36.
- [9] 王洪新. 基坑宽度对围护结构稳定性的影响[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 120-126.
WANG Hong-xin. Influence of excavation width on enclosure-structure stability of foundation pits[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(6): 120-126.
- [10] 王成华, 鹿群, 孙鹏. 基坑抗隆起稳定分析的临界宽度法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 295-300.
WANG Cheng-hua, LU Qun, SUN Peng. Critical width method for analyzing stability of foundation pits basal heave failure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 295-300.
- [11] 童磊, 刘兴旺, 袁静, 等. 深厚软弱土基坑墙底抗隆起稳定性验算的探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 707-711.
TONG Lei, LIU Xing-wang, YUAN Jing, et al. Basal heave stability analysis for excavation in deep soft clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl.2): 707-711.
- [12] 阳吉宝. 深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性 Prandtl 计算式的讨论[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 61-69.
YANG Ji-bao. A discussion of the Prandtl calculation formula for anti-uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2021, 48(2): 61-69.
- [13] 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.
HUANG Mao-song, DU Zuo-long, SONG Chun-xia. Effects of inserted depth of wall penetration on basal stability of foundation pits in clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 1097-1103.
- [14] 秦会来, 黄茂松, 马少坤. 黏土基坑抗隆起稳定分析的多块体上限解[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 73-81.
QIN Hui-lai, HUANG Mao-song, MA Shao-kun. Multi-block upper bound method for basal heave stability of braced excavations in clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 73-81.
- [15] 谭廷震, 黄茂松, 刘奕晖, 等. 基于块体剪流组合结构的黏土基坑抗隆起稳定性分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 909-918.
TAN Ting-zhen, HUANG Mao-song, LIU Yi-hui, et al. Analysis of basal heave stability of braced excavations in clay based on combined mechanisms of rigid blocks and continuous velocity field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(4): 909-918.
- [16] 程国勇, 邱睿, 段淳. 基底完全粗糙时太沙地基承载力系数的解析解[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(1): 25-28.
CHENG Guo-yong, QIU Rui, DUAN Chun. Analytical formula of K. Terzaghi ultimate bearing capacity coefficient under totally coarse foundation base[J]. **Journal of Civil Aviation University of China**, 2011, 29(1): 25-28.