

深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性Prandtl计算式的讨论

阳吉宝

A discussion of the Prandtl calculation formula for anti-uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas

YANG Jibao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菟茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析

An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory

鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 112-118

土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价

Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment

金家庆, 徐超, 梁程, 刘若桐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 86-86

基于区间非概率可靠性方法的岩溶区桩基下溶洞顶板稳定性评价

Stability evaluation of karst cave roof under pile in karst areas based on the interval non-probabilistic reliability method

秦溯, 李云安, 孙琳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 81-88

国家天文台500米口径球面射电望远镜台址球冠型边坡稳定性分析

An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China

陈德茂, 沈志平, 姜鹏, 付君宜, 刘慧 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 116-123

基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法

Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory

贺凯, 高杨, 殷跃平, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 82-89



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006031

深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性 Prandtl 计算式的讨论

阳吉宝

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 深厚软土地区采用 Prandtl 公式计算基坑抗隆起稳定性常常不满足规范要求, 给基坑支护设计带来较大困惑。本文在分析基坑开挖与 Prandtl 公式计算地基极限承载力的力学边界条件差异的基础上, 指出采用 Prandtl 计算式、临界宽度法和计入基坑内侧土体抗剪强度等改进计算方法的不足, 提出同时考虑基坑支护体内外两侧土体抗剪作用的改进计算公式。通过对 4 个计算公式各参数的敏感度分析, 发现内摩擦角是影响基坑墙底抗隆起稳定性的首要因素, 基坑挖深和支护体插入深度是主要影响因素, 土体黏聚力是次要影响因素, 土体重度的影响可以忽略。软土内摩擦角较小, 在基坑挖深一定的条件下, 只有通过加大支护体插入深度才能保证基坑墙底抗隆起稳定性, 因此, 考虑基坑支护体内外两侧土体抗剪强度的有利作用可合理优化基坑支护设计。本文通过工程实例研究, 验证了计入基坑支护体内外两侧土体抗剪强度作用的合理性; 同时, 根据浙江软土地区多项工程墙底抗隆起稳定安全系数计算结果的统计分析, 指出目前规范取值标准偏高, 在软土地区不尽合理, 建议在积累工程经验的基础上, 适当降低规范计算方法的标准限值。

关键词: 软土地区; 抗隆起稳定性; Prandtl 公式; 改进

中图分类号: TU471[†].8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0061-09

A discussion of the Prandtl calculation formula for anti-uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas

YANG Jibao

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The Prandtl formula is often used to calculate the anti-uplift stability of foundation pits in deep soft soil areas, which often fails to meet the specification requirements and brings great confusion to the design of foundation pit support. Based on the analysis of the difference in mechanical boundary conditions between the foundation pit excavation and the Prandtl formula for calculating the foundation bearing capacity, this paper points out the shortcomings of the improved calculation methods such as the Prandtl formula, critical width method, and takes into account the shear strength of the soil inside the foundation pit method, and puts forward an improved calculation formula considering the shear effect of the soil inside and outside the foundation pit support. Through sensitivity analysis of each parameter of the four calculation formulas, it is found that the internal friction angle is the most important factor affecting the stability of foundation pit wall bottom against uplift. The excavation depth and the insertion depth of the supporting body are the main influencing factors, the cohesion of soil body is the secondary influencing factor, and the influence of soil weight can be ignored. The friction angle of soft soil is small. Under certain excavation depth, the stability against uplift of foundation pit wall bottom can be guaranteed only by increasing the insertion depth. Therefore, considering the favorable effect of shear strength of soil on the

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-07-30

第一作者: 阳吉宝(1964-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计和施工技术管理工作。E-mail: yangjibao@smedi.com

inner and outer sides of foundation pit support, the foundation pit design can be reasonably optimized. This paper also verifies the rationality of taking into account the shear strength effect of soil on the inner and outer sides of the foundation pit support through engineering case studies. At the same time, according to the statistical analyses of wall bottom stability calculation of many projects, it is pointed out that the current standard is too high and unreasonable in soft soil areas. It is suggested that the standard limited value of the standard calculation method should be appropriately reduced on the basis of accumulated engineering experience.

Keywords: soft soil area; anti-uplift stability; Prandtl formula; improvement

软土地区, 基坑抗隆起稳定性是基坑工程支护设计、施工、监测和周边环境保护等必须认真考虑的问题, 它不仅关系到基坑支护结构体本身安全稳定, 还与基坑支护体和周边环境的变形密切相关, 因此基坑抗隆起稳定性验算方法一直是深受岩土工程界理论研究和工程实践广泛关注的课题。目前, 基坑抗隆起稳定性分析研究方法有极限平衡法、极限分析法和数值模拟计算法等, 但主要用于基坑支护设计且为国家标准、行业标准和我国各省市规范规程所采用的仍然是地基承载力和圆弧滑动这两种计算模式, 其中地基承载力计算模式^[1]又分为: 假定基底光滑情况下的 Prandtl (1920) 计算式和假定基底粗糙情况下的 Terzaghi (1943) 计算式。Prandtl 计算式较为常用, 也被我国行业标准^[2]和上海市工程建设标准^[3]等大多数省、市规范所采用。在深厚软土地区, 特别是在浙江宁波、温州等沿海分布有深厚淤泥质土地区, 支护体墙底土体抗剪强度指标 c, φ 均较小, 根据 Prandtl 计算式计算所得的抗隆起安全系数随挡土体插入深度加大并无太多的增大, 按规范计算所得的抗隆起安全系数不能满足规范所要求的限值标准, 造成设计人员和工程管理人员的极大困惑。为此, 王成华等^[4]根据 Terzaghi 地基承载力理论, 针对基坑隆起破坏均为单面滑动失稳的实际情况, 推导出抗隆起稳定性的临界宽度法计算式; 童磊等^[5]在收集分析浙江软土地区多项基坑工程实例的基础上, 提出一种墙底地基承载力抗隆起稳定性计算模型。这些研究工作都从不同角度提出对 Prandtl 计算式的改进。近年来, 笔者在浙江温州、宁波和福建等存在深厚淤泥质土地区进行基坑支护设计时发现, 根据现行规范的基坑墙底抗隆起 Prandtl 计算式计算的抗隆起安全系数, 即使增大支护体的插入比也还是无法满足规范要求。经对郑大同先生^[6]所介绍的 Prandtl 计算式推导过程研究, 结合现有的改进计算方法和基坑设计工作实践, 本文特提出一种对 Prandtl 计算式的改进计算方法, 并与规范、改进计算方法等进

行比较, 还对规范计算方法取值现有的标准进行探讨, 以供大家讨论。

1 现有规范和改进计算方法

1.1 规范计算方法

我国行业标准^[2]、上海市工程建设标准^[3]、浙江省工程建设标准^[7]和浙江省宁波市细则^[8]均按下面方法验算支护体墙底抗隆起稳定性, 只是 K_b 取值不同。

当基坑底部土体为淤泥、淤泥质土或黏性土时, 坑底土抗隆起稳定性应按式(1)验算支护体墙底地基承载力。计算图式如图 1 所示。

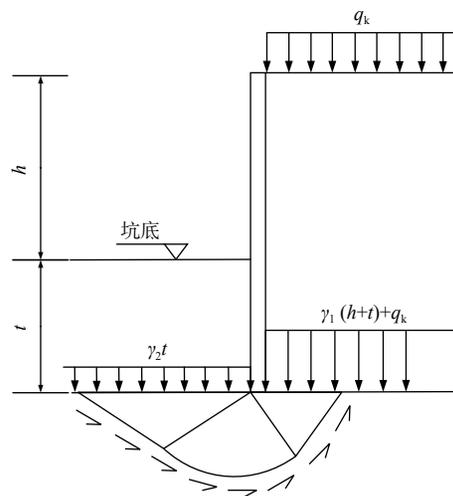


图 1 支护体墙底地基承载力验算图

Fig. 1 Diagram of foundation bearing capacity checking at the bottom of a retaining wall

$$\frac{\gamma_2 t N_q + c N_c}{\gamma_1 (h+t) + q_k} \geq K_b \quad (1)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 (45^\circ + \varphi/2)$$

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

式中: N_c, N_q ——地基土的承载力系数;

γ_1 ——坑外地表至墙底或软弱下卧层顶面, 各土层天然重度的加权平均值/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$;

- γ_2 ——坑内开挖面以下至墙底或软弱下卧层顶面各土层天然重度加权平均值/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);
- h ——基坑开挖深度/m;
- t ——支护体的插入深度/m;
- q_k ——基坑坑外地面超载/kPa;
- K_b ——支护体墙底土体抗隆起安全系数, 不同规范取值不同。

对于 K_b 取值, 按一级、二级、三级基坑, 我国行业标准^[2]、浙江省标准^[7]和宁波市细则^[8]均为分别不应小于 1.8, 1.6 和 1.4; 上海市标准^[3]为分别不小于 2.5, 2.0 和 1.7。

1.2 改进计算方法

(1) 临界宽度法

王成华等^[4]根据 Terzaghi 地基承载力理论, 针对基坑隆起破坏均为单面滑动失稳的实际情况, 按图 2 模式推导出计算抗隆起稳定性的临界宽度法计算式 K_L 。

$$K_L = \frac{p_{1u}b + T}{[\gamma(h+t) + q_k]b} \quad (2)$$

式中: K_L ——临界宽度法计算的抗隆起安全系数;

b ——临界宽度/m;

p_{1u} ——中间计算参数/kPa;

T ——滑动体竖向抗剪力/($\text{k}\cdot\text{m}^{-1}$);

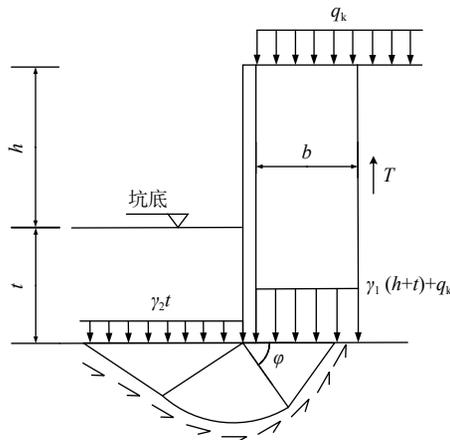


图 2 单面滑动粗糙基底抗隆起承载力示意图

Fig. 2 Diagram of uplift bearing capacity of a single-sided sliding rough substrate

其它同图 1。

具体计算式如下:

$$p_{1u} = cN_{c1} + qN_{q1} + \frac{1}{2}\gamma bN_{\gamma1}$$

$$T = (1 - \sin\phi)(h+t) \left[c + \frac{1}{2}\gamma(h+t)\tan\phi \right]$$

$$b = \sqrt{\frac{8T}{\gamma \left(2N_r - \tan\phi + \frac{1}{\cos^2\phi} \right)}}$$

其中:

$$K_{pr} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$N_{c0} = (N_{q0} - 1) / \tan\phi$$

$$N_{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{pr}}{\cos^2\phi} - 1 \right) \tan\phi$$

$$N_{q0} = \frac{e^{\left(\frac{3}{2}\pi - \phi \right) \tan\phi}}{2\cos^2(45^\circ + \phi/2)}$$

$$\lambda = \frac{\gamma h + q_k}{b\gamma}$$

$$N_{c1} = \frac{1}{2}N_{c0} + \frac{1}{2}\tan\phi$$

$$N_{q1} = \frac{1}{2}N_{q0} + \frac{1}{2\cos\phi}$$

$$N_{\gamma1} = \frac{1}{2}N_{\gamma} - \frac{1}{4}\tan\phi + \frac{\lambda}{\cos\phi} + \frac{1}{4\cos^2\phi}$$

(2) 考虑坑内上覆土抗剪强度计算法

软土地区基坑挡墙插入比普通较大, 基坑墙底隆起破坏必须穿过上覆土层, 所以, 童磊等^[3]在收集分析浙江软土地区多项基坑工程实例的基础上提出图 3 所示的墙底地基承载力抗隆起计算模型:

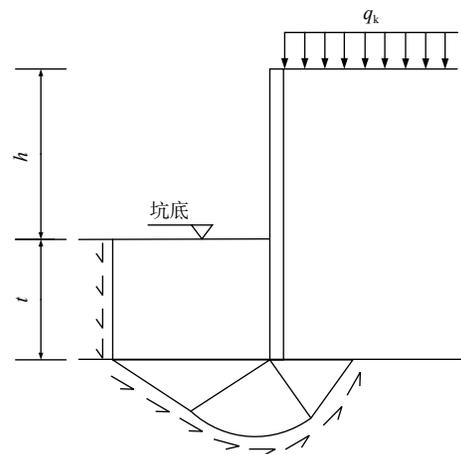


图 3 计入上覆土抗剪强度计算模式

Fig. 3 Calculation mode considering shear strength of overlying soil

$$K_j = \frac{\gamma_2 t N_q + c N_c + ct}{\gamma_1 (h+t) + q_k} \quad (3)$$

式中: K_j ——计入坑内上覆土抗剪强度的墙底抗隆起安全系数;

$$M_c = \frac{cB^2 \csc^2 \alpha}{8 \tan \varphi} (e^{\pi \tan \varphi} - 1)$$

根据平衡条件:

$$\sum M_A = M_{q_t} + M_{p_s} - M_q - M_{p_p} - M_c = 0$$

$$\text{可得: } q_t = (q + c \cdot \cot \varphi) e^{\pi \tan \varphi} \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - c \cdot \cot \varphi$$

$$\text{令: } N_q = e^{\pi \tan \varphi} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) = \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) e^{\pi \tan \varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$$

$$\text{则: } q_t = \gamma t N_q + c N_c$$

可以看出, Prandtl 的极限承载力公式与条形基础的宽度 B 无关, 这是由于推导公式时忽略不计地基土的容重所致。

2.2 Prandtl 计算式改进

分析基坑开挖而引起的隆起破坏与计算地基极限承载力的区别, 发现 Prandtl 计算式的边界假定未能充分反映在基坑开挖过程中基坑内外两侧土体对抗隆起破坏抑制的贡献, 为此在图 4 的基础上增加墙底以上土体抗剪切作用的边界条件如图 5 所示。

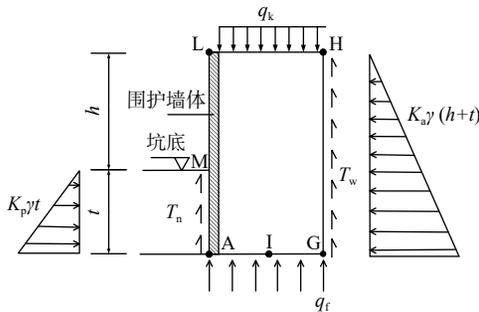


图 5 考虑坑内外两侧土体抗剪作用计算模式

Fig. 5 Calculation model considering the shear function of soil inside and outside the pit

如图 5 所示, 考虑基坑内外两侧土体抗剪作用, 在图 4 所示的 Prandtl 计算式中, 以 AIGHLMA 为竖向受力平衡体, AIG 底边作用向上的地基极限承载力 q_t , 基坑内外侧土体 AM、GH 界面上分别有内侧被动土体抗剪力 T_n 、外侧主动土体抗剪力 T_w , 地面有附加荷载作用 q_k 。 T_n 、 T_w 计算如下:

$$T_n = t \cdot \left[c + \frac{1}{2} \gamma t \cdot \tan \varphi \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$

$$T_w = (h+t) \cdot \left[c + \frac{1}{2} \gamma (h+t) \cdot \tan \varphi \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$

$$\text{令: 支护体基础宽度 } B = (h+t) \cdot \cot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\text{则有: } K_{JJ} = \frac{(cN_c + \gamma t N_q)B + T_n + T_w}{[\gamma(h+t) + q_k]B}$$

经整理, 可以得到考虑基坑墙底以上内外两侧土体抗剪作用的抗隆起安全系数计算式:

$$K_{JJ} = \frac{cN_c + \gamma t N_q + cN'_c + \gamma(h+t)N'_q}{\gamma(h+t) + q_k} \quad (4)$$

$$\text{式中: } N'_c = \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \left[1 + \frac{t}{h+t} \right]$$

$$N'_q = \frac{1}{2} \tan \varphi \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{t^2}{(h+t)^2} \cdot \tan^3 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$

3 敏感度分析

为科学、合理地分析上述 4 个公式反映的基坑抗隆起稳定性对影响因素的敏感性, 运用系统分析中的敏感性分析方法^[13], 根据敏感度函数^[14]评价基坑挖深、支护体插入深度、土层重度、土体黏聚力和内摩擦角等因素对基坑墙底抗隆起稳定性影响的差异。援引文献 [15] 工程实例, 并参考已有类似工程经验, 影响因素基准参数和变化范围列示于表 1。

表 1 影响因素基准参数和变化范围

Table 1 Benchmark parameters and variation range of the influencing factors

因素	基坑挖深 h/m	支护桩插入 深度 t/m	土层重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	土层黏聚力 c/kPa	土层内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
基准参数	9.65	12.85	17.85	4.34	10.68
变化范围	6 ~ 15	8 ~ 20	15 ~ 20	2 ~ 8	5 ~ 15

经计算, 不同计算公式对影响因素的敏感度不同, 但趋势一致(图 6)。各计算公式对影响因素的敏感度排序如表 2 所示。从表 2 可以看出, 软土的内摩擦角是首要影响因素, 这在 4 个公式中均表现一致。基坑挖深和支护体插入深度是主要影响因素, 土层黏聚力是次要影响因素。土层重度对所有公式计算结果均影响不大, 可忽略其影响。计入基坑内侧土体抗剪强度影响的改进公式因未进行严格的理论推导, 与其它 3 个公式有一定差异, 表现在 c 和 t 的敏感度排序上与其它 3 个公式不同。

在深厚软土地区, 土体 φ 值较小且变化幅度不大。当基坑挖深一定时, 为确保基坑稳定, 墙底抗隆起稳定性就只有通过加大支护体插入深度来满足规范要求。如不考虑基坑支护体墙底以上土体抗剪强度的作用, 支护墙体插入深度过大, 造成基坑支护设计的极大浪费。规范公式 K_b 和临界宽度法计算公式 K_L 均没有反映墙底以上土体抗剪强度的影响; 计算

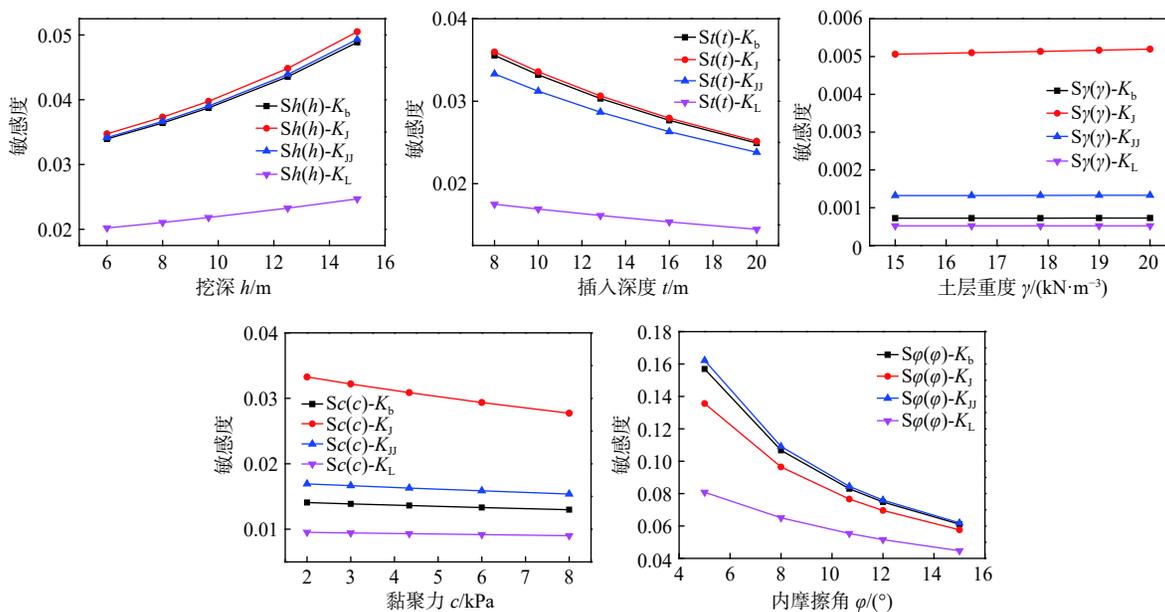


图 6 不同公式抗隆起系数与各影响因素的敏感度曲线

Fig. 6 Sensitivity curves of uplift resistance coefficient of different formulas among the different factors of foundation pit

表 2 各影响因素敏感度排序

Table 2 Ranking of sensitivity of various influencing factors

		因素敏感度排序				
公式	因素	h	t	γ	c	φ
K_b	基准值	9.65	12.85	17.85	4.34	10.68
	敏感度	0.038 7	0.030 3	0.000 7	0.013 6	0.083
	排序	2	3	5	4	1
K_j	敏感度	0.039 8	0.030 6	0.005 1	0.030 9	0.076 6
	排序	2	4	5	3	1
	敏感度	0.039	0.028 7	0.001 3	0.016 3	0.084 4
K_{Jj}	排序	2	3	5	4	1
	敏感度	0.021 8	0.016 1	0.000 5	0.009 3	0.055 4
	排序	2	3	5	4	1

式 K_j 只考虑了基坑内侧抗剪强度影响,且计算公式未通过严格的理论推导,计算依据不充分。计算式 K_{Jj} 充分考虑基坑内外两侧土体抗剪强度作用,公式推导也依据原 Prandtl 计算式的理论框架,计算结果反映了基坑围护体内外两侧土体抗剪强度的作用,对优化围护体插入深度作用十分显著。

4 工程实例

4.1 实例分析

本基坑工程位于温州市瓯海区核心片区站南单元 A-19 地块,整个用地范围内下设二层地下室,基坑开挖总面积 27 610 m^2 ,周长 841 m,基坑普遍挖深为 9.05 m;基坑北侧距基坑开挖边线 30 m 有正在运行的轻轨 R1 线,安全等级为一级,其它三侧基坑安全等级

为二级。根据勘察报告,项目场地属冲海积平原地貌,地面以下 30 m 范围内除浅部 3 m 为黏土外,其它均为淤泥。勘察揭露场地分布的②₁、②₂层淤泥具有厚度大、含水量高、压缩性高、抗剪强度低、灵敏度高等特点。②₁、②₂层淤泥的基坑支护设计岩土参数见表 3。

基坑支护设计采用桩径 900(北侧)/850(其他三侧)的钻孔灌注桩加二道混凝土内支撑。为优化桩长,按支护桩插入比分为 1 : 1.5 ~ 1 : 4.0 等 8 种情况分别验算基坑坑底抗隆起稳定性 K_0 和墙底抗隆起稳定性 (K_b 、 K_L 、 K_{Jj} 、 K_j)。验算 K_0 时,带**数据是以上海市规范^[3]以第二道内支撑为圆心的圆弧滑动计算模式计算,强度指标取峰值;另外的数值是采用浙江省标准^[7]以十字板抗剪强度指标验算。验算墙底抗隆起稳定性时,土层黏聚力和内摩擦角按固结快剪指

按峰值和 7 折取值分别验算, 计算结果见表 4。按规范要求基坑北侧需满足 $K_0 \geq 1.6$ 、 $K_0^{**} \geq 2.2$ 、 $K_b \geq 1.8$, 其它三侧需满足 $K_0 \geq 1.5$ 、 $K_0^{**} \geq 1.9$ 、 $K_b \geq 1.6$ 。根据浙江地区岩土勘察报告, 一般均建议在验算 K_b 时采用固结快剪强度 7 折指标, K_b 始终不满足要求, 但按峰值指标验算则满足要求。综合考虑坑底抗隆起稳定性系数 K_0 , 最后经专家评审确定, 基坑北侧采用 1:2.2 的插入比, 其它三侧采用 1:2.0 的插入比。目

前, 基坑工程已施工完毕, 施工过程支护体变形监测结果也表明原设计满足环境保护要求, 实践证明原设计的桩长是合理的。规范中基坑墙底抗隆起验算公式不尽合理, 在深厚软土地区, 规范中的 K_b 取值标准也不合理, 远远大于按地基承载力原理的取值标准 ($\geq 1.10 \sim 1.20$), 即使插入深度达到 1:4.0 也不满足不小于 1.6 的要求, 说明有必要重新考虑 K_b 取值标准和是否需要采用固结快剪 7 折强度指标来验算 K_b 。

表 3 基坑支护设计岩土参数表

Table 3 Parameters of the foundation pit design

土层名称	土层厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	抗剪强度指标				十字板剪切试验	
			固结快剪		三轴UU		C_u/kPa	C_u'/kPa
			c/kPa	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$		
② ₁	18	15.9	8.3/11.9*	6.7/9.6*	7.3	0.4	21.28	7.08
② ₂	20	16.2	8.5/12.1*	6.9/9.8*	8.4	0.4	35.84	12.53

注: 表中带*数据为峰值强度。

表 4 坑底和墙底抗隆起计算结果对比

Table 4 Comparison of the anti-uplift calculation results between pit bottom and wall bottom

序号	围护桩插入比	坑底抗隆起稳定系数 K_0	墙底抗隆起稳定系数			
			K_b	K_j	K_{jJ}	K_L
1	1:1.5	1.397/1.305**	1.194/1.621*	1.491/2.035*	1.321/1.796*	1.318/1.602*
2	1:1.8	1.482/1.415**	1.258/1.70*	1.578/2.147*	1.388/1.879*	1.350/1.642*
3	1:2.0	1.524/1.489**	1.295/1.745*	1.627/2.209*	1.425/1.925*	1.368/1.666*
4	1:2.2	1.558/1.564**	1.326/1.784*	1.670/2.264*	1.460/1.966*	1.384/1.685*
5	1:2.4	1.587/1.639**	1.366/1.819*	1.711/2.313*	1.488/2.003*	1.405/1.702*
6	1:2.6	1.807/1.868**	1.391/1.850*	1.745/2.357*	1.514/2.035*	1.417/1.718*
7	1:3.0	1.996/2.145**	1.435/1.904*	1.804/2.431*	1.559/2.091*	1.439/1.745*
8	1:4.0	2.231/2.715**	1.515/2.002*	1.912/2.568*	1.642/2.194*	1.478/1.794*

注: 表中带*数值是按固结快剪峰值强度指标取值; 带**数值是采用上海市规范按固结快剪峰值强度指标取值。

4.2 工程实例统计分析

为验证上述 4 个公式计算结果的合理性及标准取值问题, 选取文献^[5]中 16 项已成功实施的基坑工程案例, 因原文未交待强度指标取值问题, 所以这里只讨论软土基坑抗隆起稳定性标准取值问题。根据国家行业标准^[2]、浙江省规范^[7]和宁波市细则^[8], 一级、二级、三级基坑的标准均为分别不应小于 1.8, 1.6, 1.4; 从表 5 可以看出, 按 K_b 、 K_L 式计算有 4 项工程不符合要求; 按 K_{jJ} 式计算有 2 项工程不符合要求; 按 K_j 式计算全部达到要求。考虑基坑围护体内外两侧土体抗剪强度作用是符合工程实际的, 公式 K_j 因没有严密的理论推导过程, 同时只考虑基坑内侧土体抗剪作用, 不全面, 其计算结果反而大于考虑基坑内外两侧抗剪作用的 K_{jJ} 式计算结果, 明显不合理。所以, 应以

K_{jJ} 式来评价随着支护体插入深度增大而带来的抗隆起稳定性增加。这样, 建议按 K_b 计算式验算抗隆起稳定性时, 一级、二级、三级基坑可分别按 1.35, 1.25, 1.15 标准取值; 按 K_{jJ} 计算式验算抗隆起稳定性时, 一级、二级、三级基坑可分别按 1.45, 1.35, 1.25 标准取值。

5 结论及建议

(1) 开挖卸荷条件下的基坑抗隆起稳定性验算与在竖向荷载作用下的地基极限承载力计算是有本质区别的, 差异主要体现在基坑支护体墙底以上内外两侧土体抗剪强度对基坑抗隆起起到有利作用。简单套用 Prandtl 计算式推导的力学模型和荷载边界条件, 降低了基坑墙底抗隆起安全性, 带来设计保守和经济浪费。

表 5 浙江地区基坑抗隆起稳定系数不同公式计算结果

Table 5 Calculation results of different formulas for stability coefficient of foundation pit against uplift in the Zhejiang area

序号	项目名称	开挖深度/m	插入深度/m	土体力学参数		安全系数			
				c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	K_b	K_J	K_{JJ}	K_L
1	湖州憩园小区	4.95	11.40	9.50	6.60	1.41	1.78	1.55	1.45
2	乐清丽都华府	5.00	12.00	11.00	6.80	1.48	1.91	1.64	1.49
3	华联万豪酒店	11.60	8.90	5.00	19.00	2.57	2.70	2.80	2.28
4	乐清长途车站	5.80	13.90	10.00	7.00	1.46	1.86	1.61	1.47
5	乐清游泳馆	5.10	11.70	10.00	7.00	1.46	1.86	1.62	1.48
6	北仑人民医院	4.30	8.50	9.50	9.20	1.72	2.07	1.92	1.66
7	绍兴嘉悦广场	6.25	12.30	10.00	6.00	<u>1.27</u>	1.65	1.40	<u>1.36</u>
8	杭州杨家村安置房	7.00	10.00	16.00	8.70	1.62	2.15	1.82	1.61
9	绿都湖滨花园	6.05	12.20	11.00	7.90	1.53	1.95	1.70	1.53
10	温州广化路C地块	7.60	15.20	10.00	8.00	<u>1.49</u>	1.88	1.64	<u>1.50</u>
11	温州皇家酒店	8.35	14.20	10.00	7.00	<u>1.31</u>	1.67	<u>1.44</u>	<u>1.39</u>
12	温州广化路A地块	6.50	13.00	10.00	9.00	1.65	2.03	1.82	1.60
13	杭政储出(2007)3号地块	7.00	14.00	16.10	6.30	<u>1.42</u>	2.03	<u>1.58</u>	<u>1.46</u>
14	万坤西溪	4.85	7.50	8.00	10.00	1.67	1.93	1.85	1.63
15	镇海传化物流信息港	8.80	11.50	17.50	10.50	1.81	2.37	2.02	1.74
16	宁波万达广场	11.00	16.50	14.00	12.00	1.98	2.47	2.19	1.84

备注:表中所有项目土层重度 γ 均取 16.5 kN/m^3 ;带下划线的数值不满足规范要求。

(2)目前,改进算法中临界宽度法与 Prandtl 计算式计算结果相近;本文中(3)改进计算式推导过程不严密,计算结果不合理;本文提出的改进计算式(4),是在 Prandtl 计算式推导基础上加以改进的,区别于地基承载力计算的不同之处是考虑了基坑支护体内外两侧土体的抗剪作用,计算结果与实际相符。

(3)通过敏感度分析,影响基坑抗隆起稳定安全系数的首要因素是软土的内摩擦角,4个计算公式均表现一致;基坑挖深和支护体插入深度是主要影响因素,土层黏聚力是次要影响因素;土层重度对所有公式计算结果均影响不大,可忽略其影响。

(4)通过对浙江软土地区16项基坑工程实例分析,发现目前规范对基坑墙底抗隆起验算的标准取值偏高。建议如按 K_b 计算式验算抗隆起稳定性时,一级、二级、三级基坑可分别按1.35, 1.25, 1.15标准取值;如按 K_{JJ} 计算式验算抗隆起稳定性时,一级、二级、三级基坑可分别按1.45, 1.35, 1.25标准取值。此建议有待在软土地区基坑工程实践中加以验证。

(5)建议在修订规范时,明确验算抗隆起稳定性 K_b 时强度指标取值要求。

参考文献 (References):

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 136-142. [LIU Guobing, WANG Weidong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed.

Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 136-142. (in Chinese)]

- [2] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012. (in Chinese)]
- [3] 华东建筑设计研究院有限公司. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08—61—2018[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018. [East China Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd. Technical code for excavation engineering: DJ/TJ 08—61—2018[S]. Shanghai: Press of Tongji University, 2018. (in Chinese)]
- [4] 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 Chenhua, LUN Qun, SUN Peng. Critical width method for analyzing stability of foundation pits against basal heave failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 295 - 300. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 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 Xingwang, YUAN Jing, et al. Basal heave stability analysis for excavations in deep soft clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2013, 35(Sup 2): 707 - 711. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郑大同. 地基极限承载力的计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979: 5-9. [ZHENG Datong. Calculation of limit bearing capacity of foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1979: 5-9.(in Chinese)]
- [7] 浙江省建筑设计研究院. 建筑基坑工程技术规程: DB33/T 1096—2014[S]. 杭州: 浙江工商大学出版社, 2014. [Zhejiang Province institute of architectural design and research. Technical specification for building foundation excavation engineering: DB33/T 1096—2014[S]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University Press, 2014. (in Chinese)]
- [8] 浙江华展工程研究设计院有限公司. 宁波市建筑基坑工程技术细则: 2019甬DX—06[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. [Zhejiang Huazhan Institute of Engineering Design and Research Co., Ltd. Technical code for building foundation excavation engineering of Ningbo: 2019Yong DX— 06[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019.(in Chinese)]
- [9] 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 Bingjian, XIA Mingyao. Embedment depth and internal force of diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 103 - 114. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李和志, 赵永清, 陈春鸣. 基于极限分析法的基坑支护入土深度研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(9): 99 - 103. [LI Hezhi, ZHAO Yongqing, CHEN Chunming. Depth of driven excavations in foundation pit based on limit analysis method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(9): 99 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邹广电. 基于一个上限分析方法的深基坑抗隆起稳定分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1873 - 1878. [ZOU Guangdian. Analysis of stability against upheaval of deep excavation by an upper limit method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1873 - 1878. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈立国, 刘宝琛. 基于极限分析法求解基坑支护墙入土深度下限解[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3):54-58. [CHEN Ligu, LIU Baochen. Lower-bound solution for inserted depth of supporting pile in a foundation pit[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 54-58.(in Chinese with English abstract)]
- [13] 章光, 朱维申. 参数敏感性分析与试验方案优化[J]. 岩土力学, 1993, 14(1):51-58. [ZHANG Guang, ZHU Weishen. Parameter sensitivity analysis and optimizing for test programs[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(1):51-58.(in Chinese with English abstract)]
- [14] 高伟, 李力, 张文华, 等. 基坑工程中引起邻近地下道路沉降变形的影响因素研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(5): 6-13. [GAO Wei, LI Li, ZHANG Wenhua, et al. Study of impact factors for underground expressways settlement induced by adjacent deep excavation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(5):6-13.(in Chinese with English abstract)]
- [15] 孙淑贤. 深基坑抗隆起稳定计算方法的研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工 程版), 1999, 12(1):67-70. [SUN Shuxian. Calculation method of resistant heave stability for deep excavations[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 1999, 12(1):67-70.(in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞