

· 施 工 ·



基坑宽度对整体稳定性的影响分析

朱东风, 王国敏, 刘文世

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 在软土地区进行基坑支护结构设计时, 其整体稳定性计算往往起控制性作用。对于不能满足稳定性要求的基坑, 增加支护结构的入土深度是一种有效的解决方法。但是此方法对于空间作用明显的狭窄基坑, 效果不明显。以某软土基坑工程为例, 考虑狭窄基坑双侧滑动面在基坑中部的耦合作用, 提出利用耦合面的被动土压力以增加抗滑力矩, 减小支护结构入土深度的设计方法, 供港口工程狭窄基坑设计参考。

关键词: 软土基坑; 整体稳定性; 耦合面; 加固

中图分类号: TU 471.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0188-04

Influence of excavation width on overall stability of pits

ZHU Dong-feng, WANG Guo-min, LIU Wen-shi

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: In the structural design of foundation pits in soft soil area, the overall stability plays a controlling role. For the pits which can't meet the stability requirements, it is an effective solution to increase the penetration depth of supporting structure. However, this method works not obviously for the narrow pits with space effect. Taking a soft soil pit project for example, we account the coupling effect in the central of the narrow pit with double sliding surface, propose to increase the resistance torque of sliding using the passive earth pressure of the coupling surface, which will reduce the penetration depth of supporting structure effectively. This method provides a reference for narrow pit design in harbor engineering.

Key words: soft soil pit; overall stability; coupling surface; reinforcement

基坑整体稳定性验算是指分析基坑周围土体和围护结构一起保持稳定性的能力。在港口工程建设中, 经常遇到软土基坑稳定性的计算分析问题, 相比基坑支护结构的强度及变形要求, 软土基坑的整体稳定性验算通常更不容易满足, 因此有必要对其进行分析和研究。根据工程经验, 当基坑的宽度较小时, 稳定性较好, 需要的支护结构入土深度较浅。这种狭窄基坑在工程中并不少见, 如排洪沟渠、地下水池、地下室及卸料机基坑等。在计算中考虑狭窄基坑的有利作用, 对基坑稳定性计算理论进行改进, 减少工程造价, 对港口基坑工程建设已显得尤为重要。

1 稳定性计算方法

1.1 传统整体稳定计算方法

目前工程上应用较普遍的整体稳定验算方法是基于极限平衡理论的条分法, 这种方法仅要求滑动土条满足整体力矩平衡条件, 而不需满足土条间相互作用力的静力平衡条件, 计算得到的力矩平衡安全系数一般较低, 且不能考虑滑动土体内部的应力-应变关系^[1], 但由于这种方法计算简单、概念清晰, 在实际工程中仍然得到了广泛的应用。

力矩平衡安全系数最早由瑞典人Pettersson于1916年提出, 它假设土体处于极限平衡状态并沿某一假定的滑动面发生滑动, 土体内各土条满足

收稿日期: 2013-03-25

作者简介: 朱东风(1984—), 男, 工程师, 从事结构设计工作。

某种力矩平衡条件, 通过该平衡条件计算出总的抗滑力矩和滑动力矩, 由抗滑力矩与滑动力矩之比可以计算出安全系数, 假定多组不同的滑动面进行计算, 每一滑动面对应一个安全系数, 从中选出最小的安全系数作为该土体的整体稳定安全系数。该力矩平衡表达式可用式(1)表达^[1]:

$$K = \frac{M_r}{M_s} = \frac{\sum c_{ik} l_i + \sum (q_0 b_i + w_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{ik}}{\gamma_0 \sum (q_0 b_i + w_i) \sin \theta_i} \quad (1)$$

式中: K 为整体稳定安全系数; M_r 为抗滑力矩; M_s 为滑动力矩; c_{ik}, φ_{ik} 为最危险滑动面上土的固结不排水强度标准值; l_i 为第*i*土条的滑裂面弧长; w_i 为作用于第*i*土条的重力; θ_i 为第*i*土条弧线中点切线与水平线的夹角; γ_0 为基坑围护结构重要性系数; q_0 为地面荷载。

1.2 考虑宽度影响的整体稳定计算方法

根据计算分析, 当其他因素一定时, 基坑宽度越大, 所需要的支护结构的入土深度也越大^[2]。图1为某基坑的支护桩相对入土深度 α (基坑支护结构位于基坑底面以下的嵌固深度与基坑深度的比值) 与基坑半宽 B 的关系曲线。可以看出, 当基坑半宽 $B \leq 50$ m时, 曲线的切线斜率是比较大的, 说明基坑宽度对支护结构相对入土深度影响比较大, 进而影响基坑的稳定性^[2]。而目前应用广泛的基坑稳定性计算公式, 显然没有考虑基坑宽度的影响, 即无论基坑有多宽, 其整体稳定安全系数相同, 这明显不合理。对于宽大基坑, 应用式(1)计算是合理的, 但对于图2所示两侧整体滑动面相互耦合的情况, 尚需要考虑耦合面上的土压力的有利影响。根据经典土压力理论, 耦合面两侧土体相互挤压产生被动土压力, 当达到被动土压力时, 基坑中部土楔将产生与竖直面成 $45^\circ + \varphi/2$ (耦合面为大主应力 σ_1 作用平面, φ 为坑底土体的内摩擦角) 角度的滑裂面, 从而使土楔体向上隆起破坏, 如图3所示。

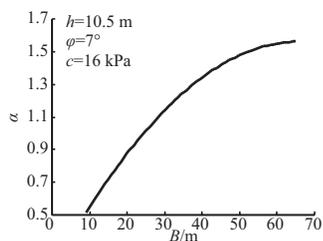


图1 α - B 关系曲线

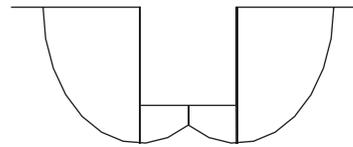


图2 基坑失稳滑动面相互耦合

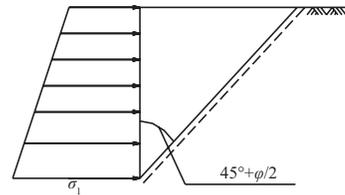


图3 耦合面处土楔滑裂面

如图4, 5所示的基坑两侧整体滑裂面通过支护结构底面, 圆弧滑动圆心位于支护结构顶面, 两侧滑动面的耦合面 AB 上的水平向被动土压力产生较大的抵抗滑动力矩, 考虑这种有利作用后可将式(1)修改为式(2):

$$K' = \frac{M_r}{M_s} = \frac{\sum c_{ik} l_i + \sum (q_0 b_i + w_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{ik} + E_p l (H + D)}{\gamma_0 \sum (q_0 b_i + w_i) \sin \theta_i} \quad (2)$$

其中: $E_p = 0.5(\sigma_a + \sigma_b)l$ (3)

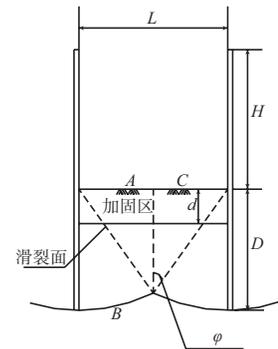


图4 超窄基坑

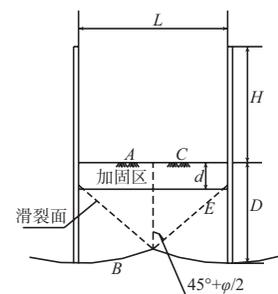


图5 窄基坑

然后根据几何关系, 可以得到耦合面 AB 的长度 l 为:

$$l = \sqrt{(H + D)^2 - L^2/4} - H \quad (4)$$

式(2)~(4)中: E_p 为耦合面 AB 上被动土压力的

合力； σ_a 、 σ_b 分别为A点和B点的土压力值； L 为基坑宽度； H 为基坑开挖深度； D 为支护结构入土深度； l 为耦合面长度。对于坑底经过加固的基坑，计算 σ_a 和 σ_b 时应按加固土的强度指标计算，这里 d 为加固深度，由坑底抗隆起稳定性控制，由抗隆起安全系数反算，可得需要的最小加固深度^[3]。

由几何关系可知：

1) 当基坑宽度满足
$$L \geq 2\sqrt{D^2 + 2HD} \quad (5)$$

基坑两侧滑裂面不再耦合，其整体稳定性可按式(1)计算，此时定义基坑为宽大基坑。

2) 当基坑宽度满足
$$\sqrt{D^2 + 2HD} \leq L < 2\sqrt{D^2 + 2HD} \quad (6)$$

此时滑裂面不与支护结构相交，耦合面上的土压力可达到经典被动土压力的大小， σ_a 和 σ_b 可按经典被动土压力计算，定义基坑为狭窄基坑。

3) 当基坑宽度满足
$$2 \sin \varphi (\sqrt{D^2 + 2HD + H^2 \cos^2 \varphi} - H \cos \varphi) \leq L \quad (7)$$

且
$$L < \sqrt{D^2 + 2HD} \quad (8)$$
 此时滑裂面BE将与支护结构相交， φ 为坑底土体的内摩擦角，如图5所示，坑壁两侧的滑动土体在耦合面AB处产生的水平力将由土楔ABEC传递至支护结构上，从而影响滑裂面的位置，此时耦合面上的土压力值将大于经典被动土压力， σ_a 和 σ_b 可按坑底土体的极限承载力计算，定义基坑为狭窄基坑。

4) 当基坑宽度
$$L < 2 \sin \varphi (\sqrt{D^2 + 2HD + H^2 \cos^2 \varphi} - H \cos \varphi) \quad (9)$$

如图4所示，此时BC面与耦合面的夹角为坑底土体的内摩擦角，根据摩擦力定律，坑底土体可以实现自稳，不会发生整体滑动破坏^[4]，土体稳定性将由坑底隆起稳定性控制，这里不作讨论。

2 被动区加固处理

对于港口工程中常见的软土基坑，一般需对坑底软土层进行加固处理。理论分析证明加固被动区土体比加固围护墙体后的主动区土体更为有效^[5]。工程中一般采用水泥土深层搅拌桩或高压旋喷桩加固，为支护桩提供良好的嵌固层，是一种较为经济有效的技术措施。但加固土体的强度指标粘聚力 c' 和内摩擦角 φ' ，一般很难准确测定，实验室比较容易测定的是加固土体的无侧限抗压

强度 q_u 。而根据已有室内和现场试验以及相关研究资料，水泥土无侧限抗压强度一般为1~5 MPa；原地基强度较高的土为5~9 MPa；有机质含量较高的土为0.3~1 MPa^[6]。周国钧等^[7]认为水泥土无侧限抗压强度一般为0.5~4 MPa，粘聚力与无侧限抗压强度的比值一般为0.2~0.3；马军庆等^[8]的研究显示，加固后土体的粘聚力与无侧限抗压强度经拟合后满足式(10)的相关关系：

$$c' = 3.2q_u^{0.6} \quad (10)$$

式中： c' 单位为kPa。而对水泥土内摩擦角值的认识则比较统一，变化在20°~30°^[6-7]。这里可以利用实验室测得水泥土的无侧限抗压强度值，取其内摩擦角为20°，采用Mohr-coulomb强度包线法来对其粘聚力进行简单校核。根据图6所示，按加固土体的无侧限抗压强度作出应力Mohr圆，取加固后内摩擦角20°，过与圆的切点作抗剪强度包线，反向延长线与竖轴的截距即为水泥土的粘聚力 c' ，可判定此值是否落在上述经验公式以内，综合后取小值而定。

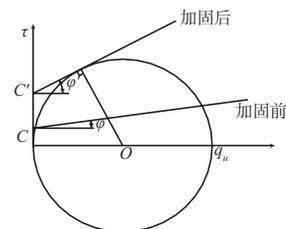


图6 加固土强度指标计算

则水泥土的粘聚力和内摩擦角增量为：

$$\Delta c = c' - c \quad (11)$$

$$\Delta \varphi = \varphi' - \varphi \quad (12)$$

考虑被动区土体加固的作用后，坑底土的粘聚力和内摩擦角加权平均值为：

$$\bar{c} = c + \frac{\pi a^2 \Delta c}{4(a+b)^2} \quad (13)$$

$$\bar{\varphi} = \varphi + \frac{\pi a^2 \Delta \varphi}{4(a+b)^2} \quad (14)$$

式中： a 为加固桩体的直径； b 为加固桩体的净间距。如图7所示，若坑底为满堂加固，则直接采用 c' 和 φ' 计算即可。

3 工程案例

某泵房基坑长度11 m，宽度7.5 m，开挖深度为6.4 m，采用SMW工法桩作围护结构，水泥土搅

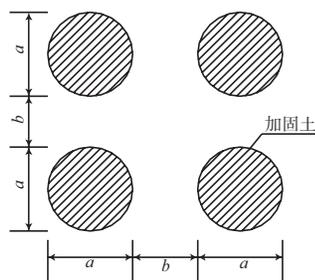


图7 加固土

拌桩直径0.65 m, 桩长12 m, 入土深度5 m, 拌桩中型钢中心距0.9 m, 桩顶冠梁处设置一道支撑。基坑底采取水泥土深层搅拌桩加固处理, 加固深度为3 m, 满堂加固, 加固后水泥土无侧限抗压强度取为0.5 MPa, 计算考虑地面超载10 kPa, 地下水按高水位至地面考虑, 场地土层参数情况如表1所示。

表1 土层参数

层号	土类名称	层厚/m	密度/(t · m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
1	杂填土	0.43	1.80	10.00	10.00	
2	黏性土	3.00	1.81	25.00	6.30	3.28
3	淤泥	15.20	1.64	13.10	1.10	1.97
4	粉质黏土	9.10	1.96	28.00	7.10	3.57

据表1资料, 该基坑坑底位于深厚的淤泥层中, 土质极差, 稳定性不易满足, 可先按照式(1)和式(2)不考虑坑底加固时计算, 再根据式(2)按照坑底加固3 m计算, 对比计算结果:

1) 按照式(1)计算(不考虑加固), 整体稳定安全系数 $K_1=0.75 < 1.6$ 。

2) 按照式(2)计算(不考虑加固), 整体稳定安全系数 $K_2=0.94 < 1.6$ 。

3) 按照式(2)计算(考虑坑底加固), 加固土体的无侧限抗压强度0.5 MPa, 加固后土体的内摩擦角可取 20° , 采用 Mohr-coulomb 强度包线法及式(10)验证后确定加固土体的粘聚力为110.24 kPa, 经判定, 基坑宽度为 $L(=7.5 \text{ m}) < \sqrt{D^2 + 2HD}(=9.43 \text{ m})$, 基坑为狭窄基坑, 可按坑底土体的极限承载力值计算被动区土体的抗滑力矩, 加固土和淤泥分开计算, 则耦合面被动土压力产生抗滑力矩: $11\ 850 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (加固土) + $1\ 101 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (淤泥) = $12\ 952 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 整体稳定安全系数: $K_3=2.17 > 1.6$, 其中加固土体产生的抗滑力矩较大。

4 结语

本文所讨论的基坑整体稳定性只是基坑稳定性计算中的一个方面, 尚需要结合其他条件综合考虑基坑底的加固深度和支护结构入土深度, 满足安全性和经济性要求, 且本文涉及的整体稳定性计算没有考虑支护结构的抗弯刚度和土体与支护结构的摩擦力的有利影响, 这从工程安全性上

考虑是合适的。

考虑基坑宽度对整体稳定性的影响对基坑的设计具有重要意义, 当不满足整体稳定性要求时不能盲目加大支护结构入土深度, 造成不必要的浪费, 特别是对于有深厚软土的基坑, 加大支护结构入土深度基本没有效果, 此时考虑对坑底被动区加固处理是一种有效的解决方法, 本文提供了一种计算加固土体强度参数的方法, 简单实用, 也可与相关文献资料对照使用, 经案例计算验证, 计算结果均在合理范围, 可以推广使用。

参考文献:

- [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.
- [2] 曾庆义, 杨晓阳. 基坑抗隆起稳定问题的应力强度计算方法[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 17-22.
- [3] 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): 1 378-1 382.
- [4] 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(6): 120-126.
- [5] 胡展飞, 周健, 杨林德. 深基坑基底软土稳定性的研究[J]. 土木工程学报, 2001(2): 84-88.
- [6] 莫海鸿, 杨小平. 基础工程[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [7] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 马军庆, 王有熙, 李红梅, 等. 水泥土参数的估算[J]. 建筑科学, 2009(3): 65-67.