

DOI: 10.11779/CJGE2017S2002

工程桩对基坑稳定性的影响及其计算方法研究

郑 刚^{1,2}, 张 涛¹, 程雪松^{*1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 通过有限差分数值模拟和极限平衡法对比计算, 对单排支撑的基坑破坏模式及坑内工程桩对基坑稳定性的影晌进行了分析, 得到以下结论: 坑内工程桩的存在能在一定程度上提高基坑稳定安全系数。单排支撑基坑的失稳滑动面更接近于绕支撑点转动的圆弧滑动面。当基坑发生失稳破坏时, 工程桩更容易发生弯曲破坏, 考虑坑内工程桩对基坑稳定的贡献时, 应取工程桩抗弯破坏时的等效抗剪强度和实际抗剪强度中的较小值。

关键词: 基坑稳定; 工程桩; 有限差分法; 极限平衡法; 等效抗剪强度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0005-04

作者简介: 郑 刚(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程的教学与科研工作。E-mail: zhengang1967@163.com。

Effect of foundation piles on excavation stability and its calculation

ZHENG Gang^{1,2}, ZHANG Tao¹, CHENG Xue-song^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: Using the finite difference method and the limit equilibrium method, the failure modes of excavations and the effect of foundation piles in excavations on excavation stability are investigated. The following conclusions are drawn: (1) The foundation piles can improve the safety factor of stability to certain degree. (2) Instability sliding surface of excavations with single level of horizontal struts is close to the circular slip surface rotating about the supporting point of the strut. (3) When instability of excavations occurs, the foundation piles tend to be subjected to bending failure rather than shear failure. While taking the contribution of foundation piles into consideration, the smaller value between the equivalent shear strength and real shear strength should be used.

Key words: excavation stability; foundation pile; finite difference method; limit equilibrium method; equivalent shear strength

0 引言

当深基坑处于周围环境比较复杂的场地时, 基坑开挖引起的变形需要严格控制。这种情况下深基坑的稳定性十分重要, 否则一旦发生失稳破坏, 或由于稳定安全系数过低而导致过大的变形^[1], 后果不堪设想。

为了提高此类深基坑的稳定性, 除提高支护结构强度和刚度外, 有时还需对坑内外主被动区土体进行加固^[2]。在软土地基中建设建筑物时, 通常需要使用桩基, 而坑内的工程桩就相当于对坑底土体的加固。如不考虑工程桩对基坑稳定的提高作用, 计算所得安全系数将偏低。但如果在考虑其作用时, 简单地将工程桩按剪切破坏来计算, 又会大大高估其对稳定性的贡献^[3-6]。因此, 有必要对坑内存在工程桩时的基坑稳定性进行正确的分析判断, 以达到既经济又安全的效果。本文针对坑内工程桩对基坑稳定性的影响以及考

虑工程桩时的基坑稳定计算方法进行了分析探讨。

1 基坑内有无工程桩的数值模拟对比

1.1 工程概况

某基坑采用 $\Phi 700 @ 900 \text{ mm}$ 灌注桩作为围护结构, 围护桩抗弯承载力为 $820 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。坑内工程桩直径 700 mm , 桩身混凝土等级为 C30, 桩身抗弯承载力约为 $83.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 抗剪承载力约为 437 kN , 基坑剖面及工程桩截面如图 1。数值计算时考虑地面超载 20 kPa , 土的强度采用由固结快剪指标推算得出的不排水强度 c_u , $c_u = c_{eu} + \sigma'_c \tan \varphi_{eu}$ (σ'_c 为上覆土有效重度), 沿深度线性增加, 内摩擦角 φ 取 0°。计算采用相关联流

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508382, 41630641); 国家重点研发计划(2016YFC0802008)

收稿日期: 2017-08-02

*通讯作者(E-mail: cheng_xuesong@163.com)

动法则。表1列出了土层的信息及物理力学参数。

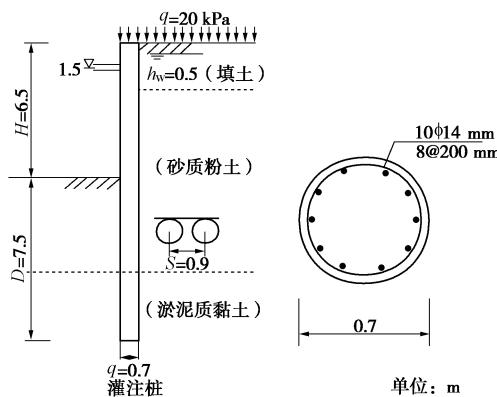


图1 基坑剖面及工程桩截面图

Fig. 1 Cross sections of excavation and foundation piles

表1 土体的物理力学参数

Table 1 Parameters of soils

土层	层厚 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	固结快剪 $\phi_{cu}/(^{\circ})$	固结快剪 c_{cu}/kPa
填土	2.0	18.0	10	0
砂质粉土	8.5	18.2	30.5	5
淤泥质黏土	5.0	16.8	12.5	10
黏土	4.5	17.7	14	15
粉质黏土	40	17.9	21	13

1.2 数值模拟

数值模拟采用强度折减法，分坑内不存在和存在工程桩两种工况进行分析，模型示意分别如图2(a)、(b)所示。根据对称性，不存在工程桩时，模型厚度取围护桩桩距的距离900 mm，存在工程桩时，模型厚度取工程桩沿厚度方向的桩距，2700 mm。

(1) 坑内不存在工程桩时数值计算结果与分析：

当坑内不存在工程桩时，计算得到的稳定安全系数为1.59。剪切塑性带从桩底通过，贯穿坑内外，如图2(a)所示，破坏时围护桩与土体以支撑与围护桩的交点为中心旋转。临界状态时，围护桩最大弯矩为538.1 kN·m，未达到其极限承载弯矩820 kN·m。说明基坑失稳时，围护桩未破坏并随土体一起运动。

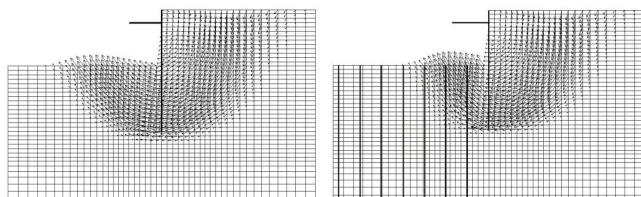


图2 临界状态时节点速率矢量图

Fig. 2 Velocity vectors of grids at critical state

(2) 坑内存在工程桩时数值计算结果与分析：

当坑内存在工程桩时，强度折减法计算所得的安全系数为2.42，较没有工程桩时提高52.2%。在FLAC

3D中，虽然对桩设定了极限塑性矩，但桩身弯矩达到塑性矩后桩仍能承载，未模拟其破坏后的状态，因此使得安全系数偏高。这部分计算是为了分析工程桩在基坑稳定中的作用以及基坑破坏机理。对比图2(a)和图2(b)可以发现，由于工程桩的阻挡作用，工况2的剪切塑性带在坑内延伸范围较工况1明显更小。

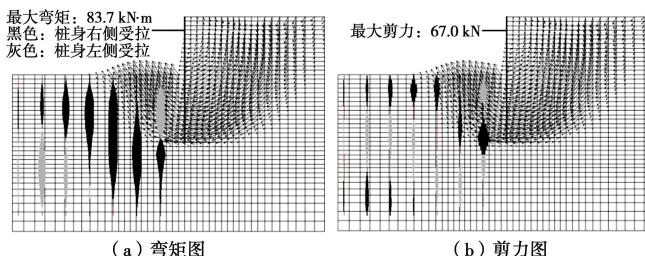


图3 工况2临界状态时工程桩桩身

Fig. 3 Foundation piles at critical state in case 2

坑内工程桩的塑性矩取抗弯承载力83.7 kN·m，由图3可知，离坑边最近的四根工程桩均达到了最大弯矩，沿剪切塑性带分布，且距坑边最近的一根工程桩存在正负两个较大弯矩，可知基坑失稳破坏时离基坑侧壁最近的几排工程桩都会弯断。而坑内工程桩最大剪力为67.0 kN，远未达到其抗剪承载力437 kN。

综上所述，坑内工程桩是由于弯曲而发生破坏。因此在考虑坑内工程桩对基坑稳定的提高作用时，不能将坑内工程桩按剪切破坏计算，否则将大大高估基坑的稳定性^[5-6]。实际上，郑刚等在研究刚性桩复合地基的稳定计算方法时就已指出了这一点。

2 极限平衡法对比计算

为了验证强度折减法的计算结果，采用极限平衡法对上述两个工况进行对比计算分析。极限平衡法中整体稳定计算采用简单条分法，坑底抗隆起稳定计算采用圆弧滑动法，土的强度指标与强度折减法中保持一致，本次计算时分层情况与各层不排水强度值如图4，各层不排水强度值取每层中心处不排水强度。

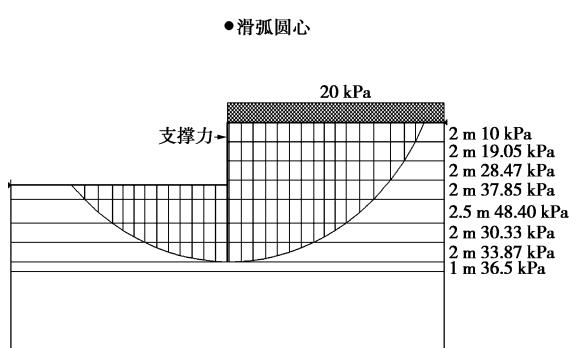


图4 整体稳定分析滑动面

Fig. 4 Slip surface of overall stability failure

2.1 坑内不存在工程桩时的计算结果

对于工况一，整体稳定计算分考虑与不考虑支撑

轴力两种情况。图 4 为极限平衡法计算整体稳定得到的滑动面。考虑支撑轴力时, 轴力值取数值模拟临界状态时的支撑轴力, 换算到每延米宽度为 452 kN。不考虑支撑轴力时, 计算结果明显小于数值分析结果, 而考虑支撑轴力时计算结果比数值分析结果稍大, 如表 2 所示。图 5 中滑动面 1, 2 分别为整体稳定计算和拟合数值模拟塑性剪切带得到的滑动面。其中滑动面 2 以支撑点为圆心, 支撑点以下桩长为半径, 此滑动面与上海《基坑工程技术规范 DG/TJ08—61—2010》^[7] 坑底抗隆起稳定验算推荐滑动面接近。由此可见, 对于此单排支撑的基坑, 在支撑未破坏的情况下, 更容易发生坑底隆起失稳。考虑到数值计算得到的临界破坏模式并非整体稳定破坏, 因此整体稳定的安全系数应比数值结果略高, 即应是考虑支撑轴力计算到的结果。由此得知, 在分析整体稳定时应考虑支撑轴力。

表 2 极限平衡法与强度折减法计算结果对比

Table 2 Comparison of calculated results between shear strength reduction method and limit equilibrium method

强度折减法	不考虑支撑轴力	考虑支撑轴力
简单条分法 (滑动面 1)	1.362	1.655
圆弧滑动法 (滑动面 2)	1.588	1.588

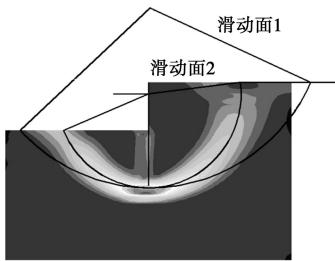


图 5 整体稳定分析与数值模拟滑动面对比

Fig. 5 Comparison of slip surfaces between overall stability and FDM method

圆弧滑动法采用滑动面 2 计算, 计算得到的安全系数为 1.588, 与强度折减法得到的安全系数几乎一致。计算图示如图 6, 计算方法为

$$F_s = \frac{M_R + M_p}{M_s} = \frac{R \sum c_i l_i + M_p}{WL} \quad . \quad (1)$$

式中 W 为 oabc 处土的总重量与超载的合力, L 为 W 的力臂长度; c_i , l_i 分别为第 i 小层的不排水强度与滑动面弧长; M_p 为桩的抗弯承载力。

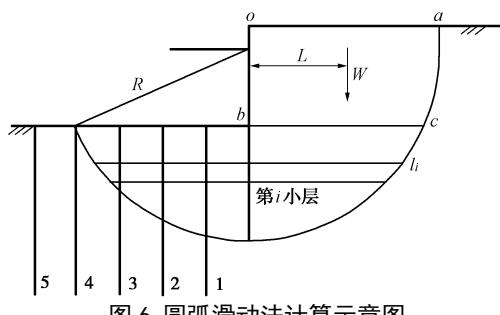


图 6 圆弧滑动法计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of circular slip method

2.2 坑内存在工程桩时的计算结果

对于工况二, 分析其整体稳定性时分别按照工程桩的实际抗剪强度和受弯破坏时的等效抗剪强度^[9]计算。轴力值取数值模拟临界状态时的支撑轴力, 换算到每延米宽度为 541 kN。第一种情况, 工程桩的抗剪强度为 437 kN, 换算到每延米宽度为 161.85 kN。整体稳定滑动面如图 7, 得到的安全系数为 11.782, 远大于强度折减法得到的安全系数 2.42, 显然极大高估了工程桩的作用 (表 3)。第二种情况, 采用受弯破坏时等效抗剪强度, 计算图示如图 8。

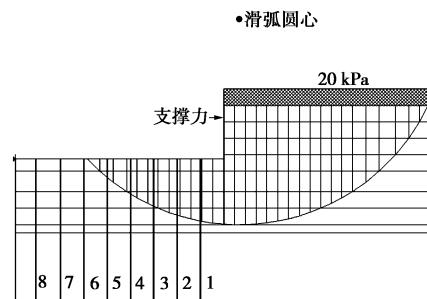


图 7 整体稳定分析滑动面

Fig. 7 Slip surface of overall stability analysis

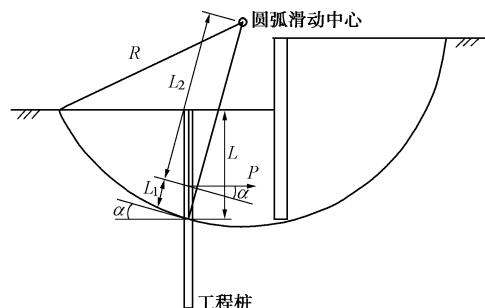


图 8 受弯破坏时等效抗剪强度计算图示

Fig. 8 Schematic diagram of calculating equivalent shear strength

由桩身抗弯强度决定的滑动面以上桩长可提供的阻滑力 P 可按下式确定:

$$M_p = P \cdot L / 3 \quad , \quad (2)$$

式中, L 为滑动面以上的桩长, M_p 为桩身抗弯强度, P 为桩体作用于土体的抗滑集中力。

设桩与圆弧相交位置圆弧切线方向与水平线方向夹角为 α 。桩抗弯强度贡献的抗滑力矩为

$$M_{RP1} = PL_2 \cdot \cos \alpha \\ = 3M_p \cdot \cos \alpha / L \cdot (R - L \cdot \cos \alpha / 3) \quad , \quad (3)$$

式中, R 为滑动面半径。

桩在滑动面的抗剪强度贡献的抗滑力矩:

$$M_{RP2} = \tau_p \cdot R \quad , \quad (4)$$

式中, τ_p 为抗剪强度。

桩由抗弯强度与桩由抗剪强度贡献的抗滑力矩相等, 即 $M_{RP1}=M_{RP2}$, 由可确定此工程桩在滑动面上的等效抗剪强度 τ_p 。

采用简单条分法计算整体稳定, 如图 7 所示的滑

动面,计算所得的 1~5 号工程桩每延米厚度的等效抗剪强度分别为 10.91, 12.02, 14.00, 17.37, 30.66 kN。最终得到整体稳定安全系数为 1.922。

采用圆弧滑动法计算坑底抗隆起稳定,如图 6 所示滑动面,计算所得 1~4 号工程桩每延米厚度的等效抗剪强度分别为 10.26, 11.44, 14.85, 73.00 kN。最终得到坑底抗隆起稳定安全系数为 1.722。

表 3 计算结果对比

Table 3 Comparison of results among different methods

计算方法	安全系数		安全系数提高比例/%
	坑内无工程桩	坑内有工程桩	
强度折减法	1.588	2.420	52.2
简单条分法, 整体稳定	1.655	1.922	16.1
圆弧滑动法, 坑底抗隆起稳定	1.588	1.722	8.4

2.3 工程桩抗弯刚度对坑底抗隆起安全系数的影响

采用工程桩受弯破坏等效抗剪强度进行以下计算, 进一步分析坑内工程桩抗弯强度对稳定安全系数的影响。为方便计算, 在工程桩抗弯强度变化时取其抗剪强度均为 600 kN, 折算后每延米抗剪强度为 222 kN。当工程桩接受弯破坏的等效抗剪强度大于实际抗剪强度时, 工程桩将发生剪切破坏, 抗剪强度则取实际抗剪强度。工程桩抗弯强度变化时, 各工程桩可使用抗剪强度及抗隆起安全系数见表 4。可以看出, 随工程桩抗弯强度提高, 安全系数逐渐增加, 但提高比例逐渐下降, 当抗弯强度达到一定值后, 工程桩由弯曲破坏转变为剪切破坏, 抗隆起安全系数将不再提高。

表 4 不同抗弯强度工程桩可使用抗剪强度及抗隆起安全系数

Table 4 Allowable shear strengths and safety factors with different flexural strengths of foundation piles

工程桩 抗弯强度 (kN·m)	工程桩可使用抗剪强度/kN				安全 系数	提高比 例/%
	1号桩	2号桩	3号桩	4号桩		
无工程桩	—	—	—	—	1.588	—
83.70	10.26	11.44	14.85	73.00	1.722	8.4
200	24.51	27.33	35.48	174.40	1.909	20.2
400	49.03	54.67	70.97	222.00	2.074	30.6
600	73.54	82.00	106.44	222.00	2.181	37.3
800	98.07	109.34	141.94	222.00	2.287	44.0
1000	122.59	136.69	177.43	222.00	2.394	50.8
1200	147.10	164.02	212.90	222.00	2.501	57.5
1400	171.65	191.39	222.00	222.00	2.576	62.2
1600	196.13	218.69	222.00	222.00	2.639	66.1
1800	220.69	222.00	222.00	222.00	2.673	68.3
2000	222.00	222.00	222.00	222.00	2.674	68.4

3 结论与建议

本文通过对有限差分数值模拟和极限平衡法进

行对比分析, 探讨了基坑破坏模式及坑内工程桩对基坑稳定的影响, 得到如下结论:

(1) 坑内工程桩的存在能在一定程度上限制塑性剪切带的延伸, 提高基坑稳定安全系数。

(2) 单排支撑的基坑, 较之于发生整体失稳, 其更容易发生坑底隆起失稳。此时坑内工程桩更容易发生弯曲破坏, 考虑其对基坑稳定的贡献时, 应取抗弯破时的等效抗剪强度和实际抗剪强度中的较小值。

参考文献:

- [1] ADBULAZIZ I, MANA G WAYNE Clough. Prediction of movement for braced cuts in clay[J]. Journal of Geotechnical Division, 1981, **107**(GT6): 759 – 777.
- [2] 马 郎, 屈若枫, 周兴涛, 等. 基坑被动区加固参数对支护结构位移影响分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊 1): 190 – 196. (MA Yun, QU Ruo-feng, ZHOU Xin-tao, et al. Effects of reinforcement parameters in passive zone of excavations on lateral deformation of supporting structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 190 – 196. (in Chinese))
- [3] HUANG J, HAN J, PORBAHA A. Two and three-dimensional modeling of DM columns under embankments[C]// ASCE GeoCongress. 2006.
- [4] NAVIN M P, FILZ G M. Numerical stability of embankments supported on deep mixed columns[C]// ASCE GSP 152, Ground Modification and Seismic Mitigation. Shanghai, 2006.
- [5] 郑 刚, 刘 力, 韩 杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤稳定性问题(II)——群桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(12): 1811 – 1820. (ZHENG Gang, LIU Li, HAN Jie. Stability of embankment on soft subgrade reinforced by rigid inclusions (II)—group piles analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(12): 1811 – 1820. (in Chinese))
- [6] 郑 刚, 刘 力, 韩 杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(I)——存在问题及单桩条件下的分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1648 – 1657. (ZHENG Gang, LIU Li, HAN Jie. Stability of embankment on soft subgrade reinforced by rigid piles (I)—background and single pile analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1648 – 1657. (in Chinese))
- [7] DG/TJ08—61—2010 上海市基坑工程技术规范[S]. 2010. (DG/TJ08 — 61 — 2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))