

文章编号: 1007-2993(2024)06-0650-05

# 抗浮锚杆整体抗浮稳定验算方法探讨

卫志强 邓文忠

(中节能建设工程设计院有限公司, 四川成都 610052)

**【摘要】** 由《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)中关于抗浮锚杆整体抗浮稳定验算的规定可知, 抗浮锚杆整体稳定性与基础下抗浮锚杆范围内总的土体重( $W$ )、结构自重和其他永久荷载( $G$ )及地下水浮力( $F_f$ )有关, 结构自重和其他永久荷载( $G$ )及地下水浮力( $F_f$ )可通过相关规定计算得出, 但规范并未给出抗浮锚杆范围内土体重( $W$ )的计算方法。对抗浮锚杆的受力情况进行了分析, 参照相关规范, 通过理论推导, 提出了抗浮锚杆整体抗浮稳定验算的计算公式。

**【关键词】** 整体抗浮; 稳定验算; 安全系数

**【中图分类号】** TU470

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.003

## Checking Calculation Method of Integral Anti-Floating Stability of Anti-Floating Anchor

Wei Zhiqiang Deng Wenzhong

(China Energy Conservation Construction Engineering Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610052, Sichuan, China)

**【Abstract】** According to the technical code for geotechnical bolt and shotcrete support engineering (GB 50086—2015), the checking calculation of anti-floating stability of anti-floating bolt as a whole can be known, the overall stability of the anti-floating anchor was related to the total weight of the soil ( $W$ ), the self-weight of the structure, other permanent loads ( $G$ ) and the buoyancy of the groundwater ( $F_f$ ) in the scope of the anti-floating anchor under the foundation, the self-weight and other permanent loads ( $G$ ) of the structure and the buoyancy of the groundwater ( $F_f$ ) can be calculated by relevant regulations. The stress of the anti-floating anchor was analyzed, and the calculation formula of anti-floating stability checking of the anti-floating anchor was put forward according to the relevant codes.

**【Key words】** integral anti-floating; stability checking; factor of safety

### 0 引言

抗浮锚杆是锚固在地基中与地下结构底板共同承担地下水浮力的抗拔构件<sup>[1]</sup>, 具有造价低廉、施工方便、受力合理等优点, 作为一种抗浮措施在工程建设中得到了广泛应用。在进行抗浮锚杆设计时, 一般需验算整体稳定性, 《高层建筑岩土工程勘察标准》(JGJ/T 72—2017)<sup>[2]</sup>、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[3]</sup>中分别给出了单根锚杆的抗拔力的计算方法及整体稳定的计算公式, 但未给出相应的计算方法。现有文献也多是从事抗浮锚杆设计方法<sup>[4]</sup>、设计优化<sup>[5-6]</sup>及实践应用<sup>[7-9]</sup>等方面进行研究, 关于抗浮锚杆整体稳定性验算的相关研究少见报道。

《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)<sup>[10]</sup>中关于抗浮锚杆整体抗浮稳定

验算作了如下规定:

$$K = \frac{W + G}{F_f} \quad (1)$$

式中:  $W$  为基础下抗浮锚杆范围内总的土体重, kN, 计算时采用浮重度;  $G$  为结构自重和其他永久荷载标准值之和, kN;  $F_f$  为地下水浮力标准值, kN;  $K$  为抗浮稳定安全系数, 应满足国家现行有关标准的规定。

从式(1)可知, 抗浮锚杆整体稳定性与基础下抗浮锚杆范围内总的土体重( $W$ )、结构自重和其他永久荷载( $G$ )及地下水浮力( $F_f$ )有关。结构自重和其他永久荷载( $G$ )、地下水浮力( $F_f$ )可按相关规定计算得出, 《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[2]</sup>并未给出抗浮锚杆范围内土体自重的计算方法, 且在规范中第 11.2.4 条附图可以看出, 抗浮锚杆范围内

土体自重由下部圆锥体与上部的长方体两部分组成。另外,《建筑工程抗浮技术标准》(JGJ 476—2019)<sup>[1]</sup>第 7.5.5 条第 3 款中也有类似的规定。

以《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)第 11.2.4 条附图为基础,绘制抗浮锚杆整体稳定计算示意图(见图 1)。通过受力分析认为,当抗浮锚杆呈整体破坏趋势时,抗浮锚杆与周围土体相互作用范围按图 1 所示的 30°角由锚杆端部向上扩散,在平面上表现为以锚杆中心为圆心的圆,圆的半径随着深度减小而不断增大。该圆半径在端部按零考虑(计算时忽略锚杆半径的影响),向上不断增大,在 A-A 剖面高度处相邻圆相切,其剖面如图 2 所示,此时相邻锚杆作用力范围尚未发生叠加,图中 4 个相邻扩散圆所围区域(充填区域)内的土体没有锚杆作用力分布;再向上时,作用力分布范围发生重叠,至 B-B 剖面高度处相邻圆相交于一点,其剖面如图 3 所示。因此 A-A 剖面至 B-B 剖面间的土体存在一个没有锚杆作用力分布的锥体范围,计算土体重时,应扣除该部分土体重,但《建筑工程抗浮技术标准》(JGJ 476—2019)和《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)均未提及该部分的土体重。

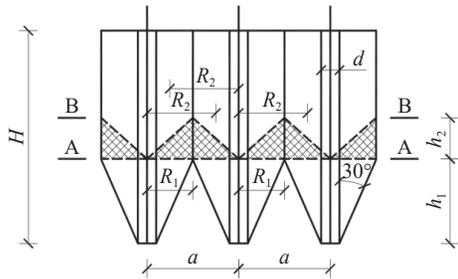


图 1 抗浮锚杆整体稳定计算示意图

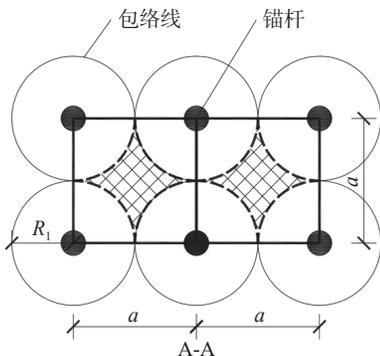


图 2 A-A 剖面示意图(正方形布置)

因此,抗浮锚杆范围内土体自重应为抗浮锚杆在周边土体作用范围内的土体自重,由下部圆锥体、上部棱柱体两部分组成,但上部棱柱体应扣除未分布作用力范围的锥体部分(图 1 中阴影部分),即:

$$W = W_1 + W_2 - W_3 \quad (2)$$

式中:  $W_1$  为下部圆锥体部分的土重, kN;  $W_2$  为上部棱柱体部分的土重, kN;  $W_3$  为未分布作用力范围锥体的土重, kN。

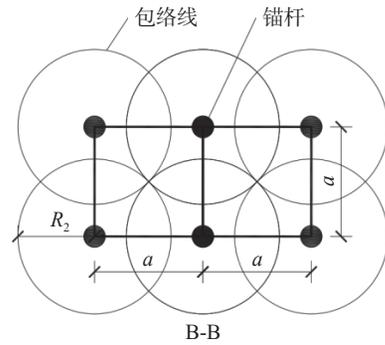


图 3 B-B 剖面示意图(正方形布置)

### 1 W 计算公式推导

实践中抗浮锚杆的平面布置形式以正方形和正三角形居多,受场地条件等限制,也存在长方形、等腰三角形等布置形式。为便于分析,本文按正方形和正三角形布置形式对  $W$  的计算公式展开推导,推导时锚杆与土体相互作用的扩散角参考《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)取 30°。

#### 1.1 正方形布置

抗浮锚杆按正方形布置时,竖向剖面参照图 1,临界处横向剖面 A-A、B-B 分别参照图 2、图 3,此时单根锚杆影响范围内土体重按以下各式计算:

$$W_1 = \pi R_1^2 h_1 \gamma'_k / 3 \quad (3)$$

$$W_2 = a^2 (H - h_1) \gamma'_k \quad (4)$$

$$W_3 = (a^2 - \pi R_1^2) h_2 \gamma'_k / 3 \quad (5)$$

$$h_1 = R_1 / \tan 30^\circ \quad (6)$$

$$h_2 = R_2 / \tan 30^\circ - h_1 \quad (7)$$

$$R_1 = a / 2 \quad (8)$$

$$R_2 = \sqrt{2} a / 2 \quad (9)$$

综合整理式(2)一式(9),可得:

$$W_0 = [a^2 H - 0.665 a^3] \gamma'_k \quad (10)$$

式中:  $H$  为抗浮锚杆总长, m;  $R_1$  为下部圆锥底面半径, m;  $h_1$  为下部圆锥高度, m;  $R_2$  为 B-B 剖面处作用力分布半径, m;  $h_2$  为 A-A 剖面至 B-B 剖面的距离, m;  $a$  为抗浮锚杆间距, m;  $\gamma'_k$  为土体浮重度, kN/m<sup>3</sup>。

## 1.2 正三角形布置

抗浮锚杆按正三角形布置时,竖向剖面参照图1,临界处横向剖面A-A、B-B如图4、图5所示,各符号意义同前。

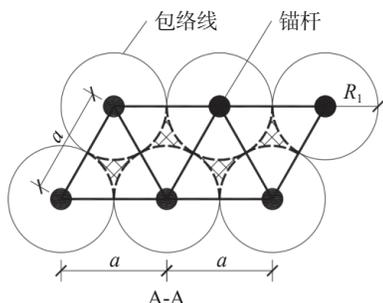


图4 A-A剖面示意图(正三角形布置)

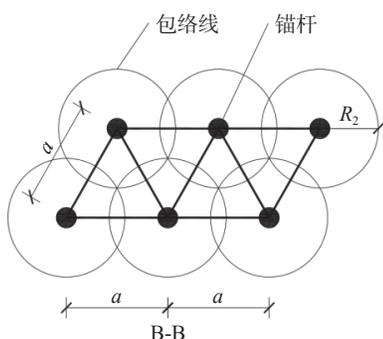


图5 B-B剖面示意图(正三角形布置)

按正三角形布置时,可将平面布置形式按菱形(平行四边形)考虑,即按单根锚杆作用范围。土体重按下列各式计算:

$$W_1 = \pi R_1^2 h_1 \gamma'_k / 3 \quad (11)$$

$$W_2 = \sqrt{3} a^2 (H - h_1) \gamma'_k / 2 \quad (12)$$

$$W_3 = (\sqrt{3} a^2 / 2 - \pi R_1^2) h_2 \gamma'_k / 3 \quad (13)$$

$$h_1 = R_1 / \tan 30^\circ \quad (14)$$

$$h_2 = R_2 / \tan 30^\circ - h_1 \quad (15)$$

$$R_1 = a/2 \quad (16)$$

$$R_2 = \sqrt{3} a/3 \quad (17)$$

由式(2)及式(11)~式(17),可得:

$$W_\Delta = [\sqrt{3} a^2 H / 2 - 0.525 a^3] \gamma'_k \quad (18)$$

由式(10)、式(18)可知,土体重与抗浮锚杆的主要设计参数锚杆间距、锚杆长度有关。当采用长方形、等腰三角形布置时,可参照上述方法计算,在此不再推导,相应临界剖面见图6—图9。

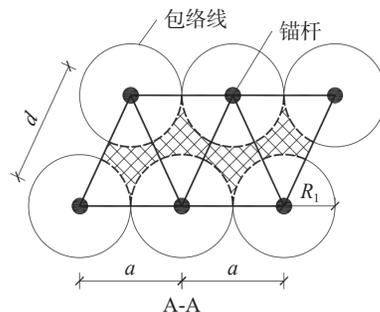


图6 A-A剖面示意图(等腰三角形布置)

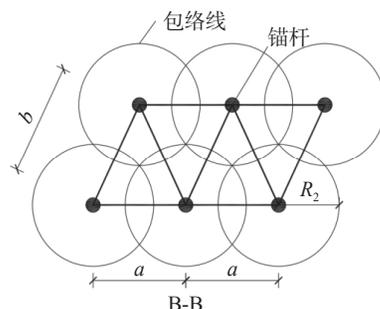


图7 B-B剖面示意图(等腰三角形布置)

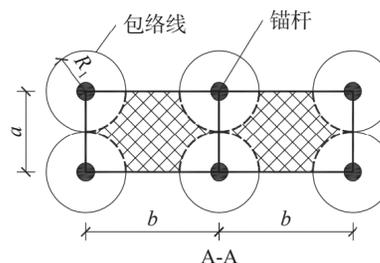


图8 A-A剖面示意图(长方形布置)

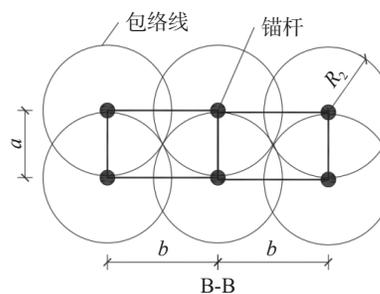


图9 B-B剖面示意图(长方形布置)

## 2 整体稳定性影响因素分析

### 2.1 锚杆平面布置形式

一般情况下,抗浮锚杆平面采用均匀布置,处理范围相同,在不考虑边缘部分影响下,由式(1)可得:

$$W = KF_f - G' \quad (19)$$

将上式两边除以单根锚杆作用面积后得到单位面积土体自重:

$$W' = KF'_f - G' \quad (20)$$

式中:  $W'$ ,  $F'_f$ ,  $G'$  分别为单位面积土体自重、单位面积水浮力、单位面积结构平均自重, kPa。结构人员进行抗浮验算时, 式(20)右边两项均为已知, 由此可计算得出单位面积土体自重。抗浮锚杆设计时, 单位面积土体自重一般经抗浮验算后得出, 抗浮锚杆设计时将其作为单位面积应提供的抗拔力进行设计计算。

将式(10)、式(18)分别除以单根锚杆作用面积后得到单位面积内锚杆长度范围内土体重:

$$\text{正方形: } W'_\square = (H - 0.665a)\gamma'_k \quad (21)$$

$$\text{正三角形: } W'_\Delta = (H - 0.606a)\gamma'_k \quad (22)$$

将式(20)分别代入式(21)一式(22)得:

$$\text{正方形: } H_\square = \frac{KF'_f - G'_k}{\gamma'_k} + 0.665a \quad (23)$$

$$\text{正三角形: } H_\Delta = \frac{KF'_f - G'_k}{\gamma'_k} + 0.606a \quad (24)$$

当按照正三角形和正方形布置时, 若单根锚杆承担面积相等, 则正三角形的边长约为正方形边长的 1.1 倍, 对比式(23)、式(24)后可以看出:  $0.665/0.606 \approx 1.1$ , 式(23)与式(24)的计算结果是相等的。

因此, 整体稳定验算时可不考虑锚杆的平面布置形式, 仅与锚杆间距及长度有关。抗浮锚杆设计时, 一般依据工程经验先确定锚杆间距后再计算锚杆长度。为便于计算, 设计时可统一按式(25)计算满足整体稳定时抗浮锚杆的长度:

$$H = \frac{KF'_f - G'_k}{\gamma'_k} + 0.67a \quad (25)$$

抗浮锚杆设计时, 可将按式(25)计算的锚杆长度, 与按照抗拔力要求计算的锚杆长度相比较, 根据计算结果取锚杆长度的最大值。式(25)中第一项一般为主体设计单位提供, 抗浮锚杆设计单位可根据其提供参数进行抗浮锚杆长度的计算, 应用上较为简洁。

当采用长方形、等腰三角形布置时, 式(25)中锚杆间距可取长方形、等腰三角形的短边长度。

## 2.2 锚杆间距

由图 1 可知, A-A 剖面位于基底时锚杆作用力范围包络线相切, 若锚杆间距继续增加, 锚杆作用力扩散至地表处也不产生叠加, 下部圆锥体半径应满足下式要求:

$$R_1 \leq H \tan 30^\circ \quad (26)$$

化简后, 得:

$$a \leq 1.15H \quad (27)$$

当锚杆间距不满足式(27)时, 锚杆破坏模式已不能按整体稳定破坏模式考虑, 计算整体稳定意义不大, 且存在一定的安全风险。设计计算时锚杆间距过近也影响锚固作用完全发挥, 应采取适宜的锚杆间距, 以利于锚杆最大程度发挥其作用。

此外, 由图 6—图 9 可以看出, 当采用长方形、等腰三角形布置时, B-B 剖面处作用范围的圆半径不宜大于短边长度, 经推导, 长方形、等腰三角形布置锚杆时, 长边长度不宜大于短边长度的 2 倍, 即  $a \geq 0.5b$ 。

## 2.3 锚杆尺寸的影响

锚杆直径一般较小, 对计算结果的影响不大。加之锚杆的重度大于土体的重度, 设计时将锚杆重考虑成周边土体重也利于安全, 因此, 设计时不考虑锚杆尺寸的影响是适宜的。

## 3 工程实例

某项目设 3 层地下室, 设计要求提供抗浮力标准值为  $70 \text{ kN/m}^2$ , 上部结构自重(含覆土重)为  $49.825 \text{ kPa}$ , 地下水浮力标准值  $F'_f$  为  $102.5 \text{ kPa}$ , 基底以下为卵石层, 浮重度为  $12 \text{ kN/m}^3$ 。设计结果为: 锚杆平面布置形式为正方形, 间距  $1.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ , 长度为  $5.5 \text{ m}$ , 单根锚杆抗拔力标准值  $190 \text{ kN}$ 。

该项目从设计、施工到交付使用过程中, 均没有相关规范对抗浮锚杆的整体稳定计算方法作出相关的规定, 设计时按照当地做法参照《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2002)等相关规范进行锚杆长度计算后, 将锚杆的抗拔力、结构自重之和与浮力的比值作为安全系数来判定整体稳定性, 计算结果为:

$$K = \frac{190 + 49.825 \times 1.6 \times 1.6}{102.5 \times 1.6 \times 1.6} = 1.21 > 1.05$$

计算结果满足抗浮要求。

若将锚杆长度范围的土体重全部计入, 计算结果为:

$$K = \frac{5.5 \times 12 + 49.825}{102.5} = 1.13 > 1.05$$

计算结果满足抗浮要求。

若按本文方法验算整体稳定性, 即按式(21)考虑, 其计算结果为:

$$W'_{\text{正}} = (5.5 - 0.665 \times 1.6) \times 12 = 53.23 \text{ kPa}$$

$$K = \frac{53.23 + 49.825}{102.5} = 1.005 < 1.05$$

抗浮锚杆处于临界状态,在外界条件发生变化时,极易失稳破坏。

按照式(25)计算锚杆长度,其结果为:

$$H = \frac{70 - 49.825}{12} + 0.67 \times 1.6 = 6.9 \text{ m}$$

从上述计算中可以看出,实际锚杆长度较本文理论计算减少约25%,存在整体失稳的风险。该项目于2013年开工建设,抗浮锚杆施工完成后,在当年雨季时发生破坏后及时采取了加固措施。

综上所述,由于存在下部圆锥体,锚杆的抗拔力并未完全发挥,验算整体稳定性时,将锚杆的抗拔力或锚杆长度范围内的土体重全部考虑成反力来验算整体抗浮稳定有其局限性,将锚杆全长范围内土体全部计入的方法与应力扩散范围不符,也不符合规范要求,计算结果偏大,存在失稳的风险,且抗拔力越大风险越高。按照图1所示范围验算整体稳定性较适宜,计算时应注意作用力的扩散范围,按照应力扩散范围来考虑土体重。

#### 4 结论

(1)抗浮锚杆整体稳定性与锚杆的平面布置形式关系不大,与锚杆受力范围内的土重( $W$ )有关。设计时可按整体稳定计算锚杆长度(即按式(25)计算),将其与按单根锚杆抗拔力计算的锚杆长度比较,取其中大值作为计算结果。

(2)抗浮锚杆设计时宜采取适宜的间距及长度,以利于最大程度发挥锚杆的锚固作用。

(3)抗浮锚杆整体抗浮稳定验算的影响因素较多,如扩散角度的选取、地层的影响等,本文未展开讨论,有待于进一步探讨。

#### 参 考 文 献

- [1] JGJ 476—2019 建筑工程抗浮技术标准 [S].
- [2] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范 [S].
- [3] JGJ/T 72—2017 高层建筑岩土工程勘察标准 [S].
- [4] 杨红梅,李玲,王胜军. 地铁车站抗浮设计方法探讨 [J]. 岩土工程技术, 2014, 28(1): 14-19.
- [5] 王浩,刘盈君,王双. 抗浮锚杆设计优化分析 [J]. 岩土工程技术, 2021, 35(6): 387-394.
- [6] 赵德骥,江永北. 全长粘结型抗浮锚杆优化设计及运用研究 [J]. 岩土工程技术, 2013, 27(2): 63-68.
- [7] 林忠伟,刘新义,林达明. 土层抗浮锚杆设计和工程实践 [J]. 岩土工程技术, 2013, 27(3): 141-146.
- [8] 郭跃龙,张钦喜. 地下建筑物浮力探讨及其设计应用 [J]. 岩土工程技术, 2009, 23(4): 11-15.
- [9] 张钦喜,范民浩,翟玉新. 承压型预应力基础抗浮锚杆关键技术研究 [J]. 岩土工程技术, 2018, 32(4): 167-182.
- [10] GB 50086—2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范 [S].

收稿日期: 2023-07-14