

DOI: 10.11779/CJGE201805009

无降水深基坑抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体设计

董天文¹, 许彬¹, 王家伟², 张建国²

(1. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000; 2. 中冶沈勘工程技术有限公司, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 基坑降水是基坑土方开挖阶段和使用阶段的重要环节, 但会打破原有的地下水平衡, 严重浪费地下水, 并引起不均匀沉降, 导致了较多的工程事故。抗浮锚杆-旋喷体是新型无降水深基坑底部的重要止水结构。基于无降水深基坑抗浮锚杆-旋喷体力学分析、阻水体有效性、支护体系安全, 确定了旋喷体处于弹性工作状态, 应用弹性力学理论建立了均匀荷载、集中荷载作用下的弹性厚板应力解, 得到了旋喷体的强度安全控制方法和抗浮锚杆的抗拔力计算方法, 并开发设计软件用于某深基坑的抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体的设计, 基坑施工监测数据表明: 在基坑土方开挖和使用阶段, 基坑内除少量侧壁渗水和自然降水外, 基坑安全性满足施工和使用要求。

关键词: 基坑工程; 无降水深基坑; 锚杆-旋喷体; 抗浮锚杆; 弹性应力解

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)05-0848-09

作者简介: 董天文(1970-), 男, 天津人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: dongtianwen111@163.com。

Design of sealing bottom water-stop body of anti-floatage anchor-jetting body in non-dewatering deep foundation pits

DONG Tian-wen¹, XU Bin¹, WANG Jia-wei², ZHANG Jian-guo²

(1. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Shenkan Engineering & Technology Corporation, MCC, Shenyang 110016, China)

Abstract: The dewatering work of foundation pits is an important part of foundation pit engineering. Because this work may break the original balance of groundwater, and cause uneven settlement of the surrounding ground surface, and serious engineering accidents. At the same time, it wastes groundwater resources seriously. The anti-floatage anchor-jetting body (AAB) of deep foundation pits is a new important sealing structure of non-dewatering deep foundation pits. Based on the analysis of the mechanics of AAB in non-dewatering deep foundation pits, the effectiveness of the water-stop body and the safety of the support system, it is determined that the jetting body is in the elastic state. Using the theory of elasticity, the stress solutions of elastic thick plate under uniform and concentrated loads are established, the strength safety control method and the relevant method for calculating anti-uplift force of anti-floatage anchor are obtained, and the software for the design of sealing bottom water-stop body of AAB in non-dewatering deep foundation pits is developed. The monitoring data of foundation pit show that, in the excavation and service, the safety of the foundation pit meets the requirements of construction, although it has a small amount of side wall seepage and natural watering.

Key words: foundation pit engineering; non-dewatering deep foundation pit; anchor-jetting body; anti-floatage anchor; elastic stress solution

0 引言

深基坑工程是高风险、高难度的系统工程, 事故危害大, 但又极具挑战性的岩土工程前沿课题。随着城镇化进程的加快和水资源的补给不足, 大中型城市的地下水已经严重匮乏, 出现了地面沉降、用水限制等情况, 引起了政府的严重关切, 未来深基坑的降水施工也将会受到一定程度的限制^[1-3]。

目前基坑工程设计理论研究主要集中在基坑支护结构稳定性、基坑变形对周围环境的影响、基坑降水

方法和侧壁阻水方法的研究, 以满足基坑的土方开挖和使用阶段的要求, 且抗浮锚杆一般是与地下室底板或基础连接, 是基础的一部分^[4-10]。

抗浮锚杆-旋喷体无降水深基坑是在基坑开挖前完成支护桩、侧壁止水帷幕、抗浮锚杆-旋喷体封底阻

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178457); 中冶沈勘科技项目(KJYF2014-001)

收稿日期: 2017-02-16

水体施工, 形成地下封闭阻水环境, 在不实施降水作业条件下开挖基坑土方, 实现地下水资源的保护, 具有显著的社会效益^[11]。因此, 有必要开展抗浮锚杆-旋喷封底阻水体的设计理论研究, 推广该新型无降水深基坑的应用。

1 抗浮锚杆-旋喷体封底的力学分析

从无降水深基坑的抗浮锚杆-旋喷体封底力学分析和支护体系安全可知, 如果旋喷体处于弹性工作状态, 那么锚杆-旋喷体的安全、旋喷体的止水作用就可以得到保证。抗浮锚杆-旋喷体封底的无降水深基坑结构见图1所示。

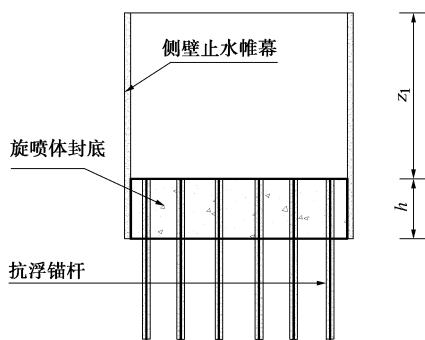


图1 无降水抗浮锚杆-旋喷体封底深基坑剖面图

Fig. 1 Section plan of AAB in non-dewatering deep foundation pit

旋喷体封底阻水体受到基坑侧壁止水帷幕的限制, 可视为四边固定的厚板。如果旋喷体上布设的抗浮锚杆为对称、均匀布置, 旋喷体所受荷载包括: 锚杆抗浮力、浮力、基底反力、旋喷体重力等, 均为对称荷载。见图2所示, 其中, γ 为旋喷体重度; q_1 为地下水对旋喷体封底的静水压力; q_2 为因旋喷体封底上边界以上土方卸载, 等效于在下边界增加一个向上的均布力作用于下边界; p_i 为锚杆抗浮力。

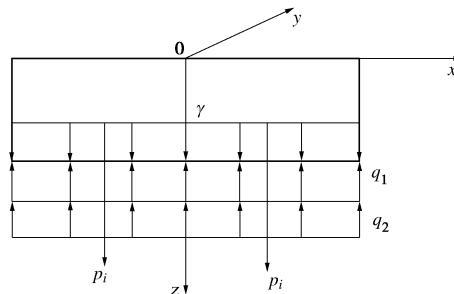


图2 旋喷体封底受力分析简图

Fig. 2 Mechanical analysis of jetting body

引用圣维南原理, 在深基坑中部区域范围内, 旋喷体厚度要小于旋喷体的平面尺寸, 不可视为薄板结构, 归属于中厚度弹性板问题^[12]。应用弹性问题的小

应变叠加原理, 研究多荷载作用条件下旋喷体的应力、应变和位移等问题。将作用于旋喷体荷载分解为受均布荷载条件和受集中荷载条件, 并分别研究, 见图3, 4。

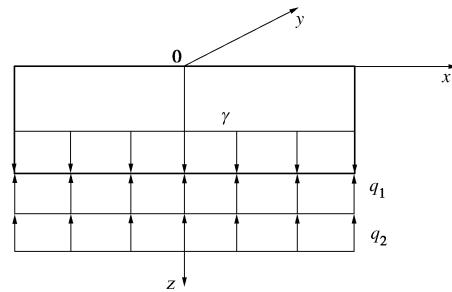


图3 均布荷载作用下的旋喷体受力分析简图

Fig. 3 Mechanical analysis of jetting body under uniform load

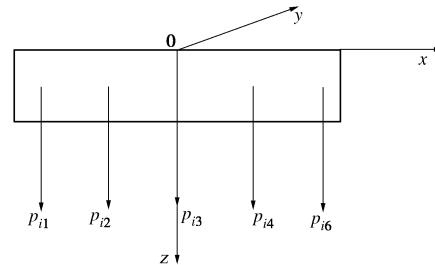


图4 集中荷载作用下的旋喷体受力分析简图

Fig. 4 Mechanical analysis of jetting body under concentrated load

2 旋喷体封底的弹性应力解

2.1 均布荷载作用下旋喷体的弹性应力解

对于旋喷体中任一点而言, 其弹性应力分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{dx} &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} e + \frac{\partial u}{\partial x} \right), \\ \sigma_{dy} &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} e + \frac{\partial v}{\partial y} \right), \\ \sigma_{dz} &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} e + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \\ \tau_{dyz} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right), \\ \tau_{dzc} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \tau_{dxy} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $e = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ 。

式(2)为空间问题的平衡微分方程,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{dx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{dyx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{dex}}{\partial z} + X &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{dy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{dzy}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{dxy}}{\partial x} + Y &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{dz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{dtx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{dyz}}{\partial y} + Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 得位移分量表示的微分方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial x} + \nabla^2 u \right) + X &= 0, \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial y} + \nabla^2 v \right) + Y &= 0, \\ \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial z} + \nabla^2 w \right) + Z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

由于旋喷体受对称的外荷载(见图3), 假设x方向位移u为零, $u=0$; y方向位移v为零, $v=0$; 在z方向设定位移函数为 $w=w(0)$ 。可以得到: $e = \frac{dw}{dz}$,

$$\frac{\partial e}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial e}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{d^2 w}{dz^2}.$$

所以从式(3)可推出:

$$\frac{d^2 w}{dz^2} = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)E} Z. \quad (4)$$

对式(4)积分得位移函数为

$$w = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2(1-\mu)E} Z(z+A)^2 + B, \quad (5)$$

式中, A, B为积分常数。

将式(5)代入式(1)得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{dx} = \sigma_{dy} &= -\frac{\mu}{(1-\mu)} Z(z+A), \\ \sigma_{dz} &= -Z(z+A), \\ \tau_{dyz} = \tau_{dex} = \tau_{dxy} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对于应力边界条件和位移边界条件, 选用旋喷体封底的下边界的应力条件分别为旋喷体重度 γ , 静水压力 q_1 , 土方卸载等效均布力 q_2 ; 上边界的位移边界的位移值为零。

$$q_1 = -\rho_{\text{水}} g(z_2 + h) = -10(z_2 + h), \quad (7)$$

$$q_2 = -\gamma_s z_1. \quad (8)$$

式中 $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度; $z_2 = z_1 - a$, z_2 为旋喷体上表面位置的地下水高度, a 为地下水稳定水位; g 为重力加速度, 取 10 kN/m^3 ; γ_s 为基坑内土方的加权平均重度。

对于下边界(应力边界), 即 $z=h$ 时:

$$X = Y = 0, \quad (9)$$

$$\bar{Z} = \gamma h + q_1 + q_2. \quad (10)$$

下边界表面方向余弦分别为: x, y方向的方向余弦为零, z方向的方向余弦为1, 即 $l=m=0$, $n=1$ 。由弹性体应力分量的边界值和下边界面力分量的关系知:

$$\left. \begin{aligned} X &= 0, \\ Y &= 0, \\ n[\sigma_{dz}]_{z=h} &= \bar{Z}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$[\sigma_{dz}]_{z=h} = \gamma h + q_1 + q_2. \quad (12)$$

将式(12)代入式(6)中的第二式得

$$\gamma h + q_1 + q_2 = -\gamma(h + A). \quad (13)$$

将式(7)、(8)代入式(13), 解A得

$$A = -\frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma}. \quad (14)$$

将式(14)代入式(5)得

$$w = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2(1-\mu)E} \gamma \left(z - \frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right)^2 + B. \quad (15)$$

应用上边界的位移边界条件, $[w]_{z=0}=0$, 代入式(15), 求解B得

$$B = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2(1-\mu)E} \gamma \left(\frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right)^2. \quad (16)$$

则均布荷载作用下的旋喷体位移函数为

$$w = -\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{2(1-\mu)E} \gamma \left(z^2 - 2z \frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right). \quad (17)$$

旋喷体封底内任一点的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{dx} = \sigma_{dy} &= -\frac{\mu}{(1-\mu)} \gamma \left(z - \frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right), \\ \sigma_{dz} &= -\gamma \left(z - \frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right), \\ \tau_{dyz} = \tau_{dex} = \tau_{dxy} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

2.2 集中荷载作用的旋喷体封底弹性应力解

集中荷载 p 作用下旋喷体封底见图5所示。将原坐标系 xyz 转换为 $x'y'z'$, 根据布辛奈斯克解, 板内任意一点 N 的极坐标应力解为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cr} &= -\frac{p}{2\pi R'^2} \left(\frac{(1-2\mu)R'}{R'+z'} - \frac{3r'^2 z'}{R'^3} \right), \\ \sigma_{c\theta} &= -\frac{(1-2\mu)p}{2\pi R'^2} \left(\frac{z'}{R'} - \frac{R'}{R'+z'} \right), \\ \sigma_{cz} &= -\frac{3pz'^3}{2\pi R'^5}, \\ \tau_{czr} = \tau_{crz} &= \frac{3pr'z'^2}{2\pi R'^5}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中, R' 为 $x'y'z'$ 坐标系中 o' 点到 N 点的长度。

将式 (19) 转换为直角坐标系得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cx'} &= -\frac{(1-2\mu)p}{2\pi R'^2} \left(\frac{z'}{R'} - \frac{R'}{R'+z'} \right), \\ \sigma_{cy'} &= -\frac{p}{2\pi R'^2} \left[\frac{(1-2\mu)R'}{R'+z'} - \frac{3r'^2 z'}{R'^3} \right], \\ \sigma_{cz'} &= -\frac{3pz'^3}{2\pi R'^5}, \\ \tau_{cz'x'} &= \frac{3pr'z'^2}{2\pi R'^5}, \\ \tau_{cx'y'} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

应用下式

$$\left. \begin{aligned} x &= x', \\ y &= y', \\ z &= z' + h, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

将式 (20) 转换为 xyz 坐标系下的应力解,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cx} &= -\frac{(1-2\mu)p}{2\pi R^2} \left(\frac{z-h}{R} - \frac{R}{R+z-h} \right), \\ \sigma_{cy} &= -\frac{p}{2\pi R^2} \left[\frac{(1-2\mu)R}{R+z-h} - \frac{3r^2(z-h)}{R^3} \right], \\ \sigma_{cz} &= -\frac{3p(z-h)^3}{2\pi R^5}, \\ \tau_{czx} &= \frac{3pr(z-h)^2}{2\pi R^5}, \\ \tau_{cxy} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中, $r^2 = x^2 + y^2$, $R^2 = x^2 + y^2 + (z-h)^2$ 。

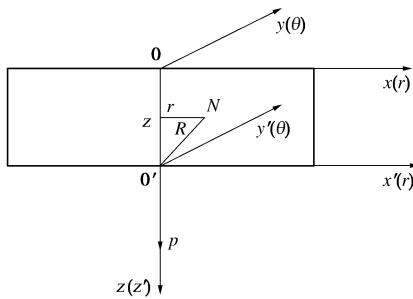


图 5 集中力作用下的旋喷体内 N 点应力解

Fig. 5 Stress solutions at point N in jetting body under concentrated loads

2.3 均布荷载和集中荷载共同作用的旋喷体封底弹性应力解

对旋喷体封底中任一点来说, 均布荷载和集中荷载共同作用下旋喷体封底的应力通解为均布荷载作用下旋喷体的弹性应力解与所有抗浮锚杆集中荷载在该点的弹性应力解叠加,

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_d + \sum_{i=1}^n \bar{\sigma}_{ci}, \quad (23)$$

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_d + \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_{ci}. \quad (24)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为均布荷载和集中荷载共同作用下旋喷体中任一点的正应力矢量; $\bar{\sigma}_d$ 为均布荷载作用下旋喷体中任一点处的正应力矢量; $\bar{\sigma}_{ci}$ 为第 i 根锚杆形成的集中荷载对旋喷体中任一点的正应力矢量; $\bar{\tau}$ 为均布荷载和集中荷载共同作用下旋喷体中任一点的剪应力矢量; $\bar{\tau}_d$ 为均布荷载作用下旋喷体中任一点处的剪应力矢量; $\bar{\tau}_{ci}$ 为第 i 根锚杆形成的集中荷载对旋喷体中任一点的剪应力矢量。

4 根锚杆围成的旋喷体封底下表面处均布荷载和抗浮锚杆引起的旋喷体内的应力。就弹性体而言, 多根抗浮锚杆在旋喷体内引起的应力变化, 应该是叠加关系。对于第 i 根—第 $i+3$ 根的四锚杆围成的底板下表面中部 M 点的应力而言 (见图 6), 该点的应力可从式 (18)、(22) 解得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Mx} &= -\frac{\mu}{(1-\mu)} \gamma \left(z - \frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right) + \\ &\quad \sum_{i=1}^4 \left[\frac{(1-2\mu)p_i}{2\pi R_i^2} \left(\frac{z_i - h}{R_i} - \frac{R_i}{R_i + z_i - h} \right) \right], \\ \sigma_{My} &= -\frac{\mu}{(1-\mu)} \gamma \left(z - \frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right) + \\ &\quad \sum_{i=1}^4 \left[\frac{p_i}{2\pi R_i^2} \left(\frac{(1-2\mu)R_i}{R_i + z_i - h} - \frac{3r_i^2(z_i - h)}{R_i^3} \right) \right], \\ \sigma_{Mz} &= -\gamma \left(z - \frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right) + \sum_{i=1}^4 \left[\frac{3p_i(z_i - h)^3}{2\pi R_i^5} \right], \\ \tau_{Mzx} &= -\sum_{i=1}^4 \left[\frac{3p_i r_i (z_i - h)^2}{2\pi R_i^5} \right], \\ \tau_{Mxy} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

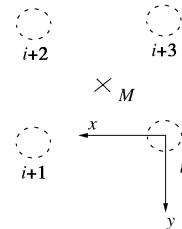


图 6 锚杆应力叠加图示

Fig. 6 Stress superposition of anchors

3 抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体的设计

3.1 静力平衡条件的锚杆-旋喷体封底阻水体设计

在不考虑锚杆间抗拔荷载的相互作用时, 此时的静力平衡状态为旋喷体封底受力的最不利状态, 旋喷体封底受力如图 7 所示。在旋喷体封底上边界, 即 $z=0$, 边界无荷载作用 ($p=0$), 对于某一微单元面积 dA , 该

面积上静力平衡条件为

$$\sigma_z dA = pdA \quad (26)$$

将式(25)中的第三式代入式(26)得

$$Ah^2 + Bh - C = 0 \quad (27)$$

式中 $\xi = x/h$; $A = 3p$; $B = 2\pi(2\gamma - 10)(1 + \xi^2)^{5/2}$; $C = 2\pi(10z_2 + \gamma_s z_1)(1 + \xi^2)^{5/2}$ 。

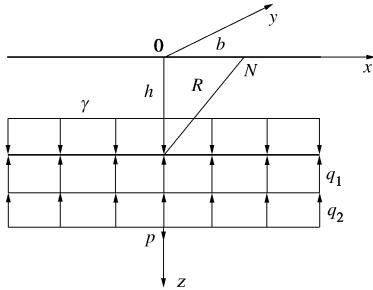


图 7 均布荷载和集中荷载作用的旋喷体受力简图

Fig. 7 Mechanical analysis of jetting body under uniform and concentrated loads

设定不同的 ξ , 解式(27), 并根据工程设计情况, 将解的负值删去, 旋喷体封底阻水体的厚度解为

$$H_1 = h = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \quad (28)$$

3.2 抗浮锚杆设计

抗浮锚杆是在旋喷体材料终凝前, 通过钻孔、下筋、注浆而成。锚杆位于旋喷体中的部分定义为外锚固段, 位于土中部分定义为锚固段。外锚固段的破坏主要是沿锚杆与旋喷体界面的破坏。锚固段的破坏是锚固体与土的界面剪移破坏, 可根据全程式锚杆设计。

(1) 外锚固段设计

a) 外锚固段极限抗拔力^[9]

在极限荷载条件下, 假定锚固体与旋喷体的界面发生剪切破坏, 锚杆在旋喷体中的剪应力按均匀分布, 剪应力极限值小于界面材料的抗拉强度设计值。

$$\tau \leq [\sigma_t], \quad (29)$$

$$p_w = \beta \pi R H \tau, \quad (30)$$

式中, β 为剪应力沿外锚固段的分布系数, 取 0.85。

解式(30)得锚杆外锚固段长度需满足:

$$H_2 = h \geq \frac{p_w}{\beta \pi R \tau} \quad (31)$$

b) 锚杆外锚固段的钢筋锚固长度

锚杆外锚固段的最小锚固长度 L_{min} 须参照文献[13]中的钢筋锚固计算。旋喷体厚度 H_{min} 须保证 $H_{min} \geq 1.1 L_{min}$ 。

$$L_{min} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (32)$$

式中 L_{min} 为钢筋的锚固长度; f_y 为钢筋的抗拉强度设计值; f_t 为旋喷体材料的抗拉强度设计值; d 为钢筋

的直径; α 为钢筋外形系数。

经上述修正后的锚固长度不应小于按上式计算锚固长度的 0.7 倍, 且不应小于 250 mm。

(2) 锚固段设计^[14]

锚杆锚固段抗拔力 p_t 计算按照抗浮锚杆计算:

$$N_a = \eta_t \gamma_Q f_{rb} \pi D l_a \quad (33)$$

式中 N_a 为锚杆轴向拉力设计值; f_{rb} 为土层与锚固体黏结强度特征值; l_a 为锚固段长度; D 为锚固体直径; η_t 为锚杆轴向拉力折减系数; γ_Q 为荷载分项系数, 可取 1.0, 或根据试验取值。

(3) 抗浮锚杆极限抗拔力的确定

抗浮锚杆极限抗拔力选用外锚固段极限抗拔力 p_w 和锚固段抗拔力 p_t 的最小值。

$$p = \min(p_w, p_t) \quad (34)$$

3.3 确定旋喷体的厚度和抗浮锚杆间距

(1) 确定旋喷体的厚度

当 $H_2 < H_1$ 时, 取 $H = H_1$; 当 $H_2 \geq H_1$ 时, 若选取 $H = H_2$ 则会出现不符合力学计算模型的情况, 会增加旋喷体厚度, 锚杆抗拔力达到极限, 经济上不合理, 因此仍选取 $H = H_1$,

$$H \geq [H] = H_1 \quad (35)$$

(2) 确定抗浮锚杆间距

设锚杆间距为 b , 则由 ξ 值求解最大锚杆间距为 $b \leq [b] = H \xi$ 。

3.4 抗浮锚杆-旋喷体的安全性分析

在荷载作用下, 在 4 根锚杆围成区域(见图 6), 旋喷体的上表面处于最不利状态(受拉), 为保证安全, 该表面不允许产生裂缝, 中点 M 的应力状态需要小于旋喷体材料的抗拉强度设计值。

旋喷体上边界(上表面) M 点的 $z=0$, 式(25)计算的旋喷体上表面中点 M 的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Mx} &= \frac{\mu}{(1-\mu)} \gamma \left(\frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right) - \\ &\quad 4p \frac{(1-2\mu)}{2\pi R^2} \left(\frac{h}{R} + \frac{R}{R-h} \right), \\ \sigma_{My} &= \frac{\mu}{(1-\mu)} \gamma \left(\frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right) + \\ &\quad 4p \frac{1}{2\pi R^2} \left[\frac{(1-2\mu)R}{R-h} + \frac{3r^2 h}{R^3} \right], \\ \sigma_{Mz} &= \gamma \left(\frac{2\gamma h - 10z_2 - 10h - \gamma_s z_1}{\gamma} \right) - 4p \frac{3h^3}{2\pi R^5}, \\ \tau_{Mx} &= -4p \left[\frac{3rh^2}{2\pi R^5} \right], \\ \tau_{My} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

式中, $R^2 = x^2 + y^2 + h^2$ 。

若旋喷体厚度为 H , 锚杆间距为 $b=H\xi$, 则式(37)化简为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Mx} &= \frac{\mu}{(1-\mu)}(2\gamma-10)H - \\ &\quad \frac{\mu}{(1-\mu)}(10z_2 + \gamma_s z_1) - 2pI \frac{1}{H^2}, \\ \sigma_{My} &= \frac{\mu}{(1-\mu)}(2\gamma-10)H - \\ &\quad \frac{\mu}{(1-\mu)}(10z_2 + \gamma_s z_1) + 2pJ \frac{1}{H^2}, \\ \sigma_{Mz} &= (2\gamma-10)H - (10z_2 + \gamma_s z_1) - 6pK \frac{1}{H^2}, \\ \tau_{Mx} &= -3\sqrt{2}pL \frac{1}{H^2}, \\ \tau_{My} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

式中, $I = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1-2\mu}{\left(\frac{\xi^2}{2}+1\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1-2\mu}{\frac{\xi^2}{2}+1 - \sqrt{\frac{\xi^2}{2}+1}} \right]$, $J = \frac{1}{\pi} \left[\frac{(1-2\mu)}{\frac{\xi^2}{2}+1 - \sqrt{\frac{\xi^2}{2}+1}} + \frac{3}{2} \frac{\xi^2}{\left(\frac{\xi^2}{2}+1\right)^{\frac{5}{2}}} \right]$, $K = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\left(\frac{\xi^2}{2}+1\right)^{\frac{5}{2}}}$, $L = \frac{1}{\pi} \frac{\xi}{\left(\frac{\xi^2}{2}+1\right)^{\frac{5}{2}}}$ 。

对于四锚杆围成的旋喷体封底而言, 旋喷体的上表面几何形心处的旋喷体所受拉应力为抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体强度设计的关键控制点, 将沿着 x 轴和 y 轴两个方向分别定义为情况一和情况二, 根据第三强度理论, 验算旋喷体的抗拉强度。

情况一:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \leq [\sigma_t], \quad (39)$$

$$[\sigma_t] \geq \frac{4p}{H^2}(I+J), \quad (40)$$

式中, $[\sigma_t]$ 为旋喷体材料的抗拉强度设计值。

情况二:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \leq [\sigma_t], \quad (41)$$

$$[\sigma_t]^2 \geq \left[\frac{2\mu-1}{1-\mu}(2\gamma-10)H - \frac{2\mu-1}{1-\mu}(10z_2 + \gamma_s z_1) - (2pI + 6pK) \frac{1}{H^2} \right]^2 + 72 \left(pL \frac{1}{H^2} \right)^2, \quad (42)$$

式中, 式(40)、(42)中的 H 为式(35)的解。

如果式(40)、(42)的应力解小于旋喷体材料抗

拉强度设计值, 锚杆外锚固段剪应力极限值小于界面材料的抗拉强度设计值(式(29)), 则设计的抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体安全。

4 工程设计与监测分析

4.1 场地工程地质及水文地质条件

钻探所揭露场地地层自上而下依次为: ①素填土: 主要由黏性土组成, 稍湿, 松散, 分布不连续, 层厚 0.2~2.8 m。①₁耕土: 主要由黏性土组成, 含少量植物根系, 稍湿, 松散, 分布连续, 层厚 0.4~0.8 m, 局部被素填土覆盖。②粉质黏土: 黄褐色, 含铁质结核, 可塑, 振动反应无, 稍有光泽, 干强度和韧性中等, 局部含细砂夹层, 分布连续, 层厚 1.9~7.1 m。③粉质黏土: 灰黑色、黄褐色, 软塑, 局部可塑, 含有少量植物残骸, 振动反应无, 稍有光泽, 干强度和韧性中等, 分布基本连续, 层厚 0.7~6.2 m。④粗砂: 黄褐色、灰褐色, 石英—长石质, 棱角形, 级配差, 混合结构, 充填大量黏性土, 局部含中砂、砾砂、圆砾夹层, 饱和, 中密状态, 分布不连续, 层厚 0.2~4.9 m。④₁细砂: 黄褐色、灰褐色, 石英—长石质, 均粒结构, 饱和, 中密状态, 分布不连续, 层厚 0.4~4.9 m。⑤砾砂: 黄褐色、灰褐色, 石英—长石质, 次棱角形, 级配较好, 混合结构, 充填少量黏性土, 夹大量粗砂和圆砾夹层, 饱和, 中密, 本次钻探未穿透该层, 最大揭露厚度为 26.8 m。⑤₁粉质黏土: 灰黑色、黄褐色, 可塑, 振动反应无, 稍有光泽, 干强度和韧性中等, 分布不连续, 层厚 0.1~4.2 m。

4.2 旋喷体封底材料的强度分析

使用 XY-100 型地质勘探钻机、旋喷桩机和泥浆泵在拟建场地基坑设计深度以下砾砂层中施工旋喷体封底, 旋喷体注浆配比按照 C25 混凝土设计。采用钻芯法取 3 组 9 个试件, 使用万能压力机, 在室温 20°、湿度 33% 的环境进行了检测。3 组试件抗压强度标准值分别为 9.64, 12.1, 11.4 MPa。除第 1 组试件的抗压强度标准值小于 C15 混凝土抗压强度标准值的 4% 外, 其余 2 组试件的抗压强度均大于 C15 混凝土抗压强度标准值。因此, 砾砂层中旋喷体材料的抗压强度基本达到 C15 混凝土抗压强度, 旋喷体封底的设计可参照 C15 混凝土抗压强度和抗拉强度设计。

4.3 抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体设计

某基坑为筒型, 面积约 211.14 m², 周长约 56 m, 深为 21.00 m(相对标高-21.5 m)。±0.000 位置相当于绝对标高 36.450 m。

(1) 本文抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体设计方法

依据本文设计方法, 编制了计算软件^[15], 设计该

深基坑抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体。地下水稳定水位为-8.5 m, 设计基坑深度 21 m, 土中锚杆锚固段长度为 7 m、锚杆间距 1.5 m、锚杆杆体换算直径 0.054 m、锚固体直径 0.15 m, 锚杆杆体钢筋选用 3 根 HRB400φ18 钢筋, 旋喷体材料的重度、泊松比分别为 22 kN/m^3 、0.2, 旋喷体材料抗拉强度设计值为 910 kPa(参照 C15 混凝土), 土层与锚固体黏结强度特征值 100 kPa, 基坑内挖方土的加权重度为 20 kN/m^3 , 水重度 10 kN/m^3 , 剪应力沿外锚固段的分布系数 0.85, 锚杆轴向拉力折减系数 0.4, 荷载分项系数 1.0。

计算的旋喷体厚度为 3.31 m, 旋喷体上表面中点 x 方向和 y 方向的拉应力分别为 361.49, 215.22 kPa, 小于旋喷体材料抗拉强度设计值 910 kPa; 锚杆极限抗拔力 131.95 kN, 满足设计锚杆抗拔力较锚杆抗拔力控制值(130 kN)要求。该基坑为一级基坑, 重要性系数 1.1, 综合考虑基坑重要性系数和旋喷体的旋喷质量, 确定旋喷体的安全系数为 1.3, 由此计算旋喷体厚度为 4.30 m, 旋喷体厚度取 5.00 m。设计布置 85 根抗浮锚杆。采用 3 根 HRB400φ18 钢筋的锚杆, 截面积为 763 mm^2 , 钢材抗拉强度设计值 360 N/mm^2 , 锚杆极限承载力为 274.68 kN, 该值大于抗拔锚杆-旋喷体的锚杆极限抗拔力 131.95 kN, 安全系数达到 2.08, 大于一级基坑临时性锚杆的锚杆体抗拉安全系数规定值 1.8。

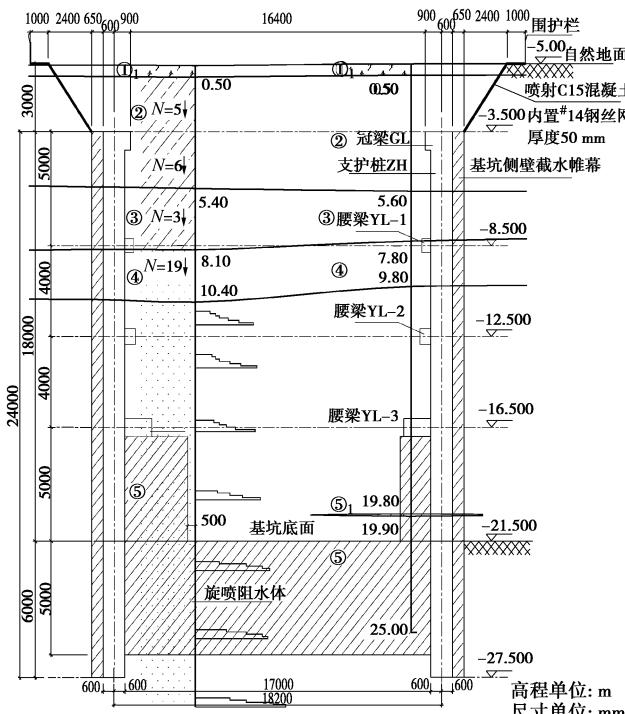


图 8 基坑剖面图

Fig. 8 Section plan of non-dewatering deep foundation pit

(2) 锚杆、旋喷体荷载叠加的抗浮设计方法

该方法是一种分算方法, 即抗浮锚杆、旋喷体分别抵抗地下水浮力, 旋喷体自重首先抵抗地下水浮力后, 余下的地下水浮力由抗浮锚杆承担, 而后将抗浮锚杆的承载力与旋喷体重力进行叠加, 其中锚杆抗拔承载力按照抗浮桩抗拔承载力进行设计。可采用理正软件计算, 预设旋喷体厚度为 5 m, 底标高为-26.5 m, 抗浮锚杆抗拉强度安全系数取 0.7, 其他参数同前。在旋喷体底标高位置的地下水浮力为 41970.95 kN, 旋喷体自重承担的地下水浮力为 22687.42 kN, 占地下水总浮力的 54.06%; 抗浮锚杆承载力要超过 19283.53 kN。根据单根抗浮锚杆抗拔力 230.79 kN, 锚杆根数为 83.55, 取锚杆根数 85 根, 故抗浮锚杆-旋喷体满足抗地下水浮力的设计要求, 但并不能确定在地下水浮力、旋喷体自重、基坑内土方卸荷、锚杆抗拔力共同作用下旋喷体是否出现拉破坏。

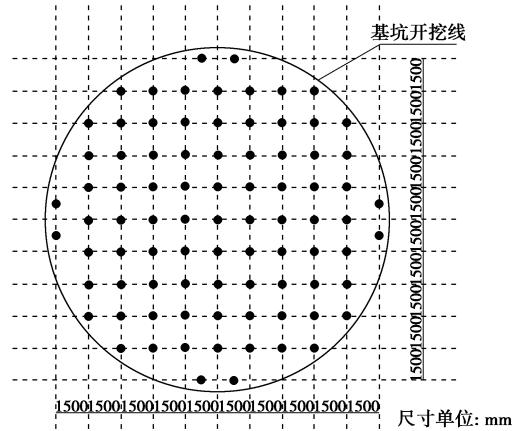


图 9 抗浮锚杆平面布置图

Fig. 9 Plan of anti-flootation anchor

4.4 无降水抗浮锚杆-旋喷体封底深基坑施工监测

基坑侧壁采用支护桩-环形混凝土梁的支护体系, 护坡桩为 C25 现浇混凝土, 桩径 1.2 m, 桩长 24 m。基坑侧壁采用高压旋喷桩结合护坡桩帷幕; 环形混凝土梁为一道冠梁和三道腰梁, 采用 C30 混凝土。旋喷体采用 669 根 φ1000 三重管高压旋喷桩封底, 厚度 5 m; 施工 85 根长 12 m、杆体为 3 根 HRB400φ18 的抗浮锚杆, 见图 8, 9 所示。基坑监测布置护坡桩竖直位移监测点 6 个、深层水平位移观测点 6 个。基坑开挖后, 每 5 d 监测一次, 共进行 22 次, 位移监测数据见表 1。

基坑开挖过程中, 基坑外地下水位始终在-8.5 m 左右, 基坑监测数据显示抗浮锚杆-旋喷体的变形、支护结构的变形在允许范围内(30 mm), 基坑稳定性良好, 旋喷体封底和旋喷桩侧壁结构的止水帷幕未发生破坏, 坑内未发生地下水涌入现象(见图 10), 少量侧壁渗水和天然降水由明排法排出坑外。由于旋喷

体封底和侧壁止水帷幕、支护桩形成一个空间支护体系, 基坑的竖向变形和水平变形均较小, 该型无降水深基坑支护体系具有进一步优化的空间。工程监测数据表明无降水作业抗浮锚杆-旋喷体封底深基坑的支护体系设计和阻水体设计可行。

表1 基坑位移监测值

Table 1 Monitoring values of displacement of foundation pit

测点	深度 / m	竖向位移值 / mm	水平位移值 / mm
Z01	13	0.4	2
	18	0.6	3
	22	0.6	
Z02	13	0.6	3
	18	0.7	2
	22	0.7	
Z03	13	0.7	1
	18	0.8	2
	22	0.9	
Z04	13	0.3	1
	18	0.5	2
	22	0.5	
Z05	13	0.4	2
	18	0.5	1
	22	0.6	
Z06	13	0.4	3
	18	0.4	2
	22	0.5	



图10 抗浮锚杆-旋喷体封底无降水深基坑

Fig. 10 Sealed bottom of non-dewatering deep foundation pit by AAB

4.5 讨论

本文提出了基于抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体协同工作的设计方法(方法一)与抗浮锚杆、旋喷体封底的荷载叠加设计分算方法(方法二)。方法一在未考虑基坑重要性系数和旋喷体质量等安全性系数条件下, 所设计的无降水抗浮锚杆-旋喷体深基坑旋喷体厚度为3.31 m, 较方法二旋喷体厚度减小1.69 m。两种方法设计选用的抗浮锚杆长度、锚固体直径、锚杆钢筋、锚杆间距相同, 方法一计算的锚杆极限抗拔力131.95 kN, 比较符合土层锚杆极限抗拔力(130 kN),

抗浮锚杆承担的抗浮承载力为11215.75 kN; 方法二的锚杆抗拔力按照抗浮桩计算, 单根抗浮锚杆抗拔力为230.79 kN, 这一计算结果偏于不安全, 坑底锚杆总抗浮承载力19283.53 kN, 锚杆总抗浮力占地下水浮力的45.94%。方法一计算旋喷体自重为18773.50 kN, 旋喷体自重与抗浮锚杆总承载力之和为29989.25 kN, 占地下水浮力(41970.95 kN)的71.45%, 说明在地下水浮力、基坑内土方卸荷等荷载共同作用下, 旋喷体可视为受力构件, 与抗浮锚杆形成组合阻水体发挥协同工作, 承担了约30%的地下水浮力。

两种设计方法对比可知, 方法一具备清晰的荷载作用过程, 考虑了基坑内土方卸荷、地下水浮力、锚杆抗浮力等共同作用下抗浮锚杆-旋喷体的协同工作, 分别从荷载作用效应、抗浮锚杆极限抗拔力、旋喷体强度、基坑重要性系数等方面保障了设计的安全性; 方法二是一种考虑极限条件的分算方法, 即以基坑开挖到设计标高后, 地下水浮力分别由旋喷体和抗浮锚杆承担, 这种方法模糊了实际工作状态下锚杆-旋喷体的力学特性, 旋喷体封底阻水体设计的安全性具有不确定性。

5 结语

抗浮锚杆-旋喷体无降水深基坑工程是在基坑开挖前完成侧壁止水帷幕、锚杆-旋喷体封底阻水体的连续性阻水体系的施工, 并使之共同形成地下封闭阻水环境, 在不实施降水作业条件下进行基坑土方开挖和施工作业。基于无降水深基坑抗浮锚杆-旋喷体力学分析、阻水体有效性、支护体系安全, 确定旋喷体需要处于弹性工作状态, 应用弹性力学理论建立了均布荷载、集中荷载作用下的弹性厚板应力解, 得到了旋喷体的强度安全控制方法和抗浮锚杆的抗拔力计算方法, 并开发设计软件用于某无降水深基坑的抗浮锚杆-旋喷体封底阻水体的设计。基坑施工监测数据表明: 在基坑土方开挖和使用阶段, 基坑内除少量侧壁渗水和自然降水外, 基坑满足施工和使用的安全性要求, 说明本文提出的设计方法可用于工程设计。

参考文献:

- [1] 国办发[2013]2号. 实行最严格水资源管理制度考核办法[S]. 2013. (State Council of the PRC. The implementation of the most stringent water resources management system assessment methods[S]. 2013. (in Chinese))
- [2] 辽宁省人民政府令255号. 辽宁省禁止提取地下水规定[S]. 2011. (The People's Government of Liaoning Province. Provisions for the prohibition of groundwater extraction in

- Liaoning Province[S]. 2011. (in Chinese))
- [3] 山东省人民政府. 山东省用水总量控制管理办法[S]. 2011. (The People's Government of Shandong Province. Measures for the control of total amount of water used in Shandong Province[S]. 2011. (in Chinese))
- [4] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J]. 岩土工程学报, 2000, 5(3): 348 - 352. (LI Guang-xin. Separate calculation and combination calculation of water and soil pressure on retaining structure of foundation pit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 5(3): 348 - 352. (in Chinese))
- [5] OU C Y, HSIEH P G. A simplified method for predicting ground settlement profiles induced by excavation in soft clay[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(8): 987 - 997.
- [6] 龚晓南, 张杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(1): 145 - 149. (GONG Xiao-nan, ZHANG Jie. Analysis of settlement of overlying soil caused by depressurization of confined water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 32(1): 145 - 149. (in Chinese))
- [7] MANGUSHEV R, LASHKOVA E, SMOLENKOV V, et al. The construction of deep excavation ditch in weak soil in St. Petersburg[C]// Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground-proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft. Rome, 2012: 653 - 657.
- [8] 徐日庆, 张庆贺, 刘鑫. 考虑渗透性的水-土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 33(5): 961 - 964. (XU Ri-qing, ZHANG Qing-he, LIU Xin. Calculation method of water soil pressure considering permeability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 33(5): 961 - 964. (in Chinese))
- [9] 孙仁范, 刘跃伟, 徐青, 等. 带地下室或裙房高层建筑抗浮锚杆整体计算方法[J]. 建筑结构, 2014, 6: 27 - 30, 41. (SUN Ren-fan, LIU Yue-wei, XU Qing, et al. The calculation method of anti-floating anchor with a basement or high-rise building overall podium[J]. Building Structure, 2014, 6: 27 - 30, 41. (in Chinese))
- [10] GAO Quan-chen, YANG Zhuo, WANG Hong-bo, et al. Application of water-proof curtain with high-pressure injection concrete piles in foundation pit[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 744-746: 447 - 450.
- [11] 中冶沈勘工程技术有限公司. 一种无降水作业的锚杆旋喷封底深基坑逆作施工方法: 中国, CN201410234064.8[P]. 2014-08-20. (Shenyang Survey Engineering Technology Co., Ltd of MCC. Reverse construction method for bolt grouting bottom sealing deep foundation pit without precipitation operation: China, CN201410234064.8[P]. 2014-08-20. (in Chinese))
- [12] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996. (XU Zhi-lun. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996. (in Chinese))
- [13] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 2011. GB50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. 2011. (in Chinese))
- [14] GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 2013. (GB50330 — 2012 Technical code for building slope engineering[S]. 2013. (in Chinese))
- [15] 中冶沈勘工程技术有限公司. 无降水抗浮锚杆封底混凝土底板设计软件 V1.0: 中国, 2016SR155519[P]. 2016-06-24. (Shenyang Survey Engineering Technology Co., Ltd of MCC. Design software of back cover concrete floor of anti-floating anchor bolt without precipitationV1.0: China, 2016SR155519[P]. 2016-06-24. (in Chinese))