

杨淑娟,谭昉珺,于德湖,等.使用过程中地下工程自然排水体系设计[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(4):33-39. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.005

YANG S J, TAN F J, YU D H, et al. Design and Research on Natural Drainage System of Underground Engineering in Use [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(4): 33-39. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.005

使用过程中地下工程自然排水体系设计

杨淑娟*,谭昉珺,于德湖,许卫晓,牛梦娇

(青岛理工大学 蓝色经济工程建设与安全协同中心,山东 青岛 266033)

摘要:地下结构使用过程中的抗浮失效大多是由于暴雨天气下基坑内雨水汇集过快,使基坑内地下水位超出建筑设计抗浮设防水位,建筑物使用过程的抗力小于地下水位产生的浮力,导致抗浮失效.为了减少建筑抗浮失效问题,针对建筑使用过程进行研究,对基坑渗流量和雨水汇集量进行计算,提出一种建筑使用过程中的新型自然排水体系.对该体系进行案例分析,证明该体系可保持抗浮水头的稳定性,可供设计人员参考.

关键词:地下工程;自然排水体系;建筑使用过程

中图分类号:TU463 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)04-0033-07

Design and Research on Natural Drainage System of Underground Engineering in Use

YANG Shujuan, TAN Fangjun, YU Dehu, Xu Weixiao, NIU Mengjiao

(Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: The anti-floating failure of the underground structure was mostly due to the rapid accumulation of rainwater in the foundation pit during heavy rain, which made the groundwater level in the foundation pit exceed the anti-floating waterproof position of the building design, the resistance of the building use process was less than the buoyancy generated by the groundwater level, resulting in anti-floating failure. In order to reduce the problem of anti-floating failure of buildings, the research on the construction process was carried out, and the seepage flow and the amount of rainwater collected by the foundation pit were calculated, and a new natural drainage system in the process of building use was proposed. A case study of the system proved that the system can maintain the stability of the anti-floating head and can be used by designers.

Keywords: underground engineering; natural drainage system; building usage process

随着城市建设的快速发展,地上面积已经不能满足建筑的需要,现代建筑不断地朝着地下空间发展.城市地下空间的利用率正随着地铁、地下商场和车库等的修建而不断提高,建筑物基础埋置越来越深^[1-3].在使用过程中,地下室底板的水头压力受到场区内部地下水汇水量的影响也越来越大^[4].因此,设计合理的排水体系对建筑使用过程十分重要.文章结合不同的基坑类型研究了外界补给对基坑内部水位的影响,提出一

种使用过程中的自然排水体系,并进行案例分析,为后续工程中的抗浮设计问题提供参考依据。

1 使用过程汇水量计算

1.1 雨水汇集量

建筑物建造结束后,通常需要在建筑物周边进行排水设计、道路铺设以及其他功能区建设,从而确保在正常使用阶段雨水能够有效汇集。降雨时,建筑物的屋顶、周边道路以及其他功能区的雨水首先会汇集到地面,然后借助周围的排水系统流走,而园地、绿化带的雨水则会由于地表的渗透作用而渗透到地下,然后在地下结构的原基坑范围内汇集。使用阶段雨水汇集示意图如图1所示。

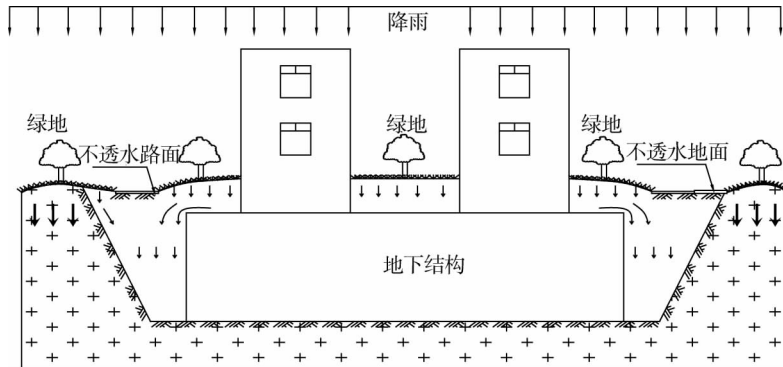


图1 使用阶段雨水汇集

在降雨过程中,地表水会发生蒸发,忽略其对雨水汇集量的影响,那么在正常使用过程中,降雨量包含排水系统排出的部分和渗透到地下的部分。单位时间基坑内的雨水汇集量 q 为基坑上口雨水汇集量减去各类屋面地面的雨水汇集量,即

$$q = q_i S - q_i \sum S_i \psi \quad (1)$$

式中: q_i 为降雨强度; S 为基坑上口面积; S_i 为不同屋面地面面积; ψ 为地表综合径流系数。

1.2 基坑侧渗流量

为了满足基坑开挖以及地下施工作业的相关要求,大部分基坑在施工过程中均会设置止水帷幕、支护结构等。由于在基坑的内外,其水头存在差异,基坑外侧的地下水可能会通过止水帷幕或者支护结构渗透到基坑的内侧,即发生基坑侧渗流,其流量与止水帷幕以及支护结构的渗透系数密切相关。基坑侧渗流计算简图如图2所示,图2中 h_d 为地下结构底到止水帷幕或者基坑支护结构底的距离。

由达西定律可得基坑侧渗流量 Q_c 的计算公式为

$$Q_c = \int_0^h k \frac{h}{d} l dh = \frac{klh^2}{2d} \quad (2)$$

式中: h 为基坑内外水头差; k 为止水帷幕或者支护结构的渗透系数; d 为基坑止水帷幕或者支护结构的厚度; l 为基坑的周长。

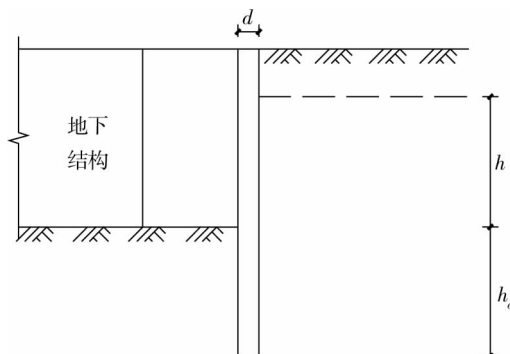


图2 基坑侧渗流计算

2 使用过程中自然排水体系设计方案

2.1 自然排水体系设计方案基本思路

目前,释放水浮力以及排水井排水是建筑使用阶段比较常用的2种排水方式^[5].如果在建筑物建造时发现结构没有足够的抗浮能力且结构本身的抗浮能力也无法继续增加,则会使用排水井排水的方法.释放水浮力法适用于抗浮水位较低的情况^[6],当基坑的底部安装好透水以及集水系统之后,方可对基础等进行施工,该方法的使用会影响关键线路的工期,同时需要进行长时间的控制和维护.因此,提出一种更为经济合理、便于施工的使用过程自然排水体系.

自然排水体系是将隔水层以及滤水层设置在基坑内部建筑物的周围,从而使汇入基坑内部的水可以有组织地排出的一种新型排水设计方法.选择级配好、透水性强材料作为滤水层来承担排水作用,选择透水性较小的材料作为隔水层,承担隔水作用,使使用过程中基坑内部的水头可以保持稳定.自然排水体系设计方案如图3所示.

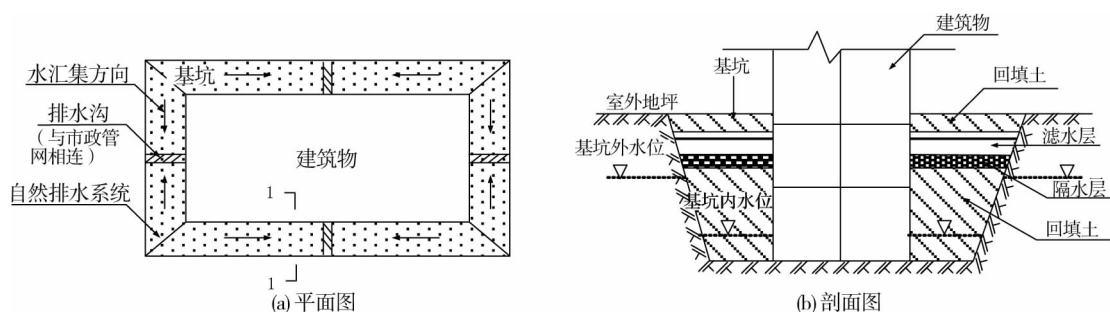


图3 自然排水体系

在设计时,滤水层的单位排水量需要高于基坑侧渗流和单位降雨排水量的总和,即基坑内的汇水速度需要低于水平渗流速度.隔水层采用的材料,其渗透系数应相对较小,并且需要保证水在隔水层不会出现上下贯通的现象,否则隔水层将起不到任何作用(如淤泥质土的渗透系数很小,但因其是饱和状态,其自身包含的水也会渗出,会导致水贯通隔水层).考虑到现场施工机械的影响,施工机械的操作难度与隔水层的厚度呈正相关关系.因此,为了使施工机械的操作满足相关要求,应对隔水层厚度有所约束.

在市政管网雨水管道中,起始端的覆土深度应不低于0.7 m,终端的设置深度应不超过3.5 m^[7].为了满足上述要求并保证雨水可以通过城市管网及时地排出,在隔水层的上方需要设置一定的坡度,从而使雨水可以在雨水管道中汇集,同时,自然排水体系需要布置在3.5 m范围之内.

在易发生暴雨的地区,可以采用一般排水井与强制排水相结合的方式作为应急措施,从而满足突发情况的排水要求.在排水沟附近设置一定数量的排水井,同时将水泵以及水位探测装置布置到排水井中.当水位达到抗浮设计水头时,需要将水泵立即开启并进行抽水,从而保证基坑内不会进入雨水^[8].另外,在隔水层的下部、排水井的底部和四周应设置一定的隔水措施,避免由于排水井的存在而导致汇集的雨水渗入到基坑内部.在隔水层的上方,需要砌筑具有良好透水性的透水砖,确保水可以顺利地进入到排水井的内部^[9].具体做法应结合具体工程情况进行设计.

2.2 滤水层详细设计

2.2.1 滤水层截面宽度

滤水层截面宽度即在滤水层高度处基坑边缘到建筑物之间的距离(保守计算,滤水层高度取滤水层底面高度).滤水层截面宽度受多种因素的影响,主要包括基坑工作面宽度、基坑底部到滤水层的距离和土方放坡系数.

$$b = l_0 + mH. \quad (3)$$

式中: b 为滤水层的截面宽度; l_0 为基坑工作面宽度; m 为土方放坡系数; H 为滤水层底面到基坑底部的距离.

滤水层宽度计算简图如图4所示.

2.2.2 滤水层厚度

滤水层厚度计算简图如图5所示.

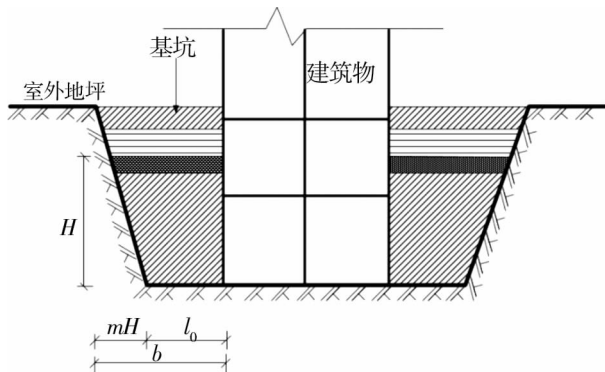


图4 滤水层宽度计算

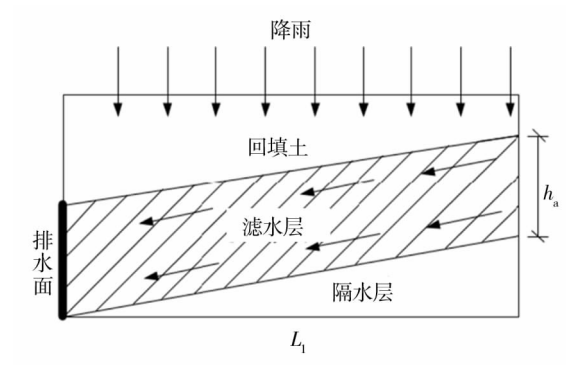


图5 滤水层厚度计算

水满布滤水层即排走,且上部回填土无水压的情况下,根据达西定律计算滤水层渗流量 Q_1 为

$$Q_1 = kAi = k_a b h_a \int_0^{L_1} \frac{h_a + i_a l}{L \sqrt{i_a^2 + 1}} dl = k_a b h_a \frac{h_a \ln L_1 + i_a L_1}{\sqrt{i_a^2 + 1}} \quad (4)$$

式中: A 为过水断面面积; i 为水力梯度; k_a 为滤水层的渗透系数; h_a 为滤水层厚度; L_1 为水平渗流距离; i_a 为滤水层坡度.

滤水层的渗流速度 v 为

$$v = ki = k_a \frac{h_a \ln L_1 + i_a L_1}{\sqrt{i_a^2 + 1}} \quad (5)$$

实际渗流速度 v_s 为

$$v_s = \frac{v}{n} = k_a \frac{h_a \ln L_1 + i_a L_1}{n \sqrt{i_a^2 + 1}} \quad (6)$$

式中: n 为滤水层土的孔隙率.

由滤水层渗流量计算公式可以推导出滤水层厚度的计算公式为

$$h_a = \sqrt{\frac{Q_1 (i_a^2 + 1)^{\frac{1}{4}}}{k_a b \ln L_1} + \frac{i_a^2 L_1^2}{4 (\ln L_1)^2} - \frac{i_a L_1}{2 (\ln L_1)^2}} \quad (7)$$

2.2.3 不同基坑的滤水层设计

基坑内外的地下水渗流作用由于止水帷幕、支护结构的设置而发生改变^[10-11],导致降雨对基坑内外的地下水产生很大的影响.因此,不同的基坑类型需要设计不同的滤水层.

1) 封闭型基坑

对于封闭型基坑,其底部和侧面的渗透性较小,基坑外的水不易渗入到基坑内,在计算基坑汇水量时,通常不考虑基坑侧面渗水和底部渗水对基坑汇水的影响,因此,可只考虑滤水层将降雨排出的情况.在设计滤水层时,滤水层的单位面积排水量应大于等于降雨量,即

$$Q_1 = k_a b h_a \frac{h_a \ln L_1 + i_a L_1}{\sqrt{i_a^2 + 1}} \geq q_i S - q_i \sum S_i \psi \quad (8)$$

2) 半开放型基坑

半开放型基坑分为底部开放型基坑和侧面开放型基坑.底部开放型基坑的特点是侧面透水性较差,基底土层渗透性较强,底部渗流速度较快,以底部渗流为主.侧面开放型基坑的特点是基坑底部有弱透水层,基底渗流速度很小,以侧面渗流为主^[12].

对于底部开放型基坑,其周围的雨水会由基坑的底部汇集到基坑的内部,但由于自然排水体系中在滤

土层之下设置有隔水层,基底渗入的雨水几乎不会进入滤水层,因此,底部开放型基坑滤水层单位排水量的计算与封闭型基坑相同.

对于侧面开放型基坑,其周围的雨水会由基坑的侧面渗透到基坑的内部,因此,单位时间汇水量 $Q_{\text{侧}}$ 等于单位降雨量与基坑侧渗流的总和,即

$$Q_{\text{侧}} = q_i S - q_i \sum S_i \psi + \frac{klh^2}{2d}. \quad (9)$$

在进行滤水层的设计时,滤水层的单位排水量应不小于降雨和基坑侧渗流的总和,即

$$Q_1 = k_a b h_a \frac{h_a \ln L_1 + i_a L_1}{\sqrt{i_a^2 + 1}} \geq Q_{\text{侧}}. \quad (10)$$

3) 开放型基坑

开放型基坑主要为砂质基坑,土层的渗透系数较大,基底渗流和侧渗流速度较快,如果基坑外侧的地下水位低于基坑内侧,则基坑内部的地下水将会沿着基坑的侧面和底面向基坑的外部渗流.当发生降雨时,地下水位将会快速上升,但是这种类型的基坑很难存储地下水,如果基坑的内部没有地下水,则基坑外部的地下水对其几乎没有影响.因此,开放型基坑不需要再使用该自然排水体系.

2.3 隔水层的详细设计

隔水层的厚度受多种因素的影响,主要包括渗透时间、边界效应、变形和施工操作.在进行设计时,需要满足降雨时间小于雨水透过隔水层的时间.隔水层应适当地进行加厚设计,从而保证其发生变形后的渗透性仍可满足要求,但为了保证施工机械操作的相对简便,需要对隔水层的厚度进行适当的约束.

在饱和状态下,隔水层在 Z 轴上的渗流量利用达西定律进行计算:

$$Q_2 = kA i = \frac{k_b b L_2 H_s}{H_s/2 + h_b}. \quad (11)$$

式中: Q_2 为隔水层垂直渗流量; k_b 为隔水层的渗透系数; L_2 为隔水层计算长度; H_s 为隔水层上方积水高度; h_b 为隔水层厚度.

渗流速度 v' 为

$$v' = k i = \frac{k_b H_s}{H_s/2 + h_b}. \quad (12)$$

实际渗流速度为

$$v_s' = \frac{k_b H_s}{n(H_s/2 + h_b)}. \quad (13)$$

隔水层计算简图如图6所示.

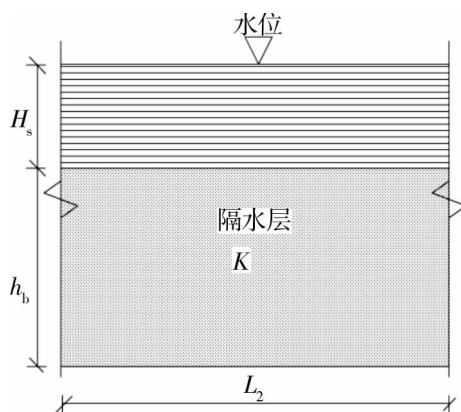


图6 隔水层计算

在进行自然排水体系隔水层设计选择时,滤水层的渗流量 Q_1 和实际渗流速度 v_s 要远大于隔水层的渗流量 Q_2 和实际渗流速度 v_s' , 即

$$Q_1 \gg Q_2, v_s \gg v_s' \tag{14}$$

3 案例分析

3.1 项目概况

对青岛地区某塔楼进行分析,其主楼和地下车库分别为剪力墙和框剪结构,抗震设计等级分别为三级和四级,结构的使用年限设置为 50 a.主楼地下车库的基础形式分别为墙下条形基础+筏板基础和柱下独立基础+墙下条形基础+防水板.地上和地下的层数分别为 25 层和 1 层,车库高 3.9 m,建筑高度 81.9 m.车库基础底标高-6.45 m,顶板标高 1.6 m.底板厚度 0.3 m,顶板厚度 0.3 m,框架柱尺寸为 0.6 m×0.6 m,框架柱之间的主要跨度为 8.1 m.主楼及地下车库的结构平面图如图 7.

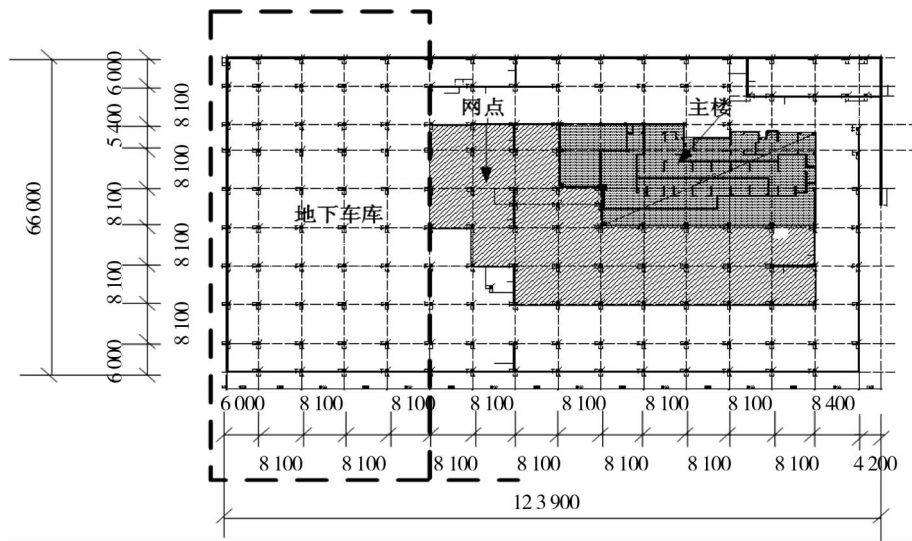


图 7 项目结构

3.2 使用过程基坑内水位分析

基坑边坡到地下车库的外墙之间的平均距离为 2 m,基坑的平均开挖深度为 7 m.假设滤水层的渗透系数为 k_a .降雨强度 0.01 m/h,持续降雨时间 $t=24$ h,土的孔隙率为 0.5,地下水位为 2.77 m.基坑内除建筑物外面积 $A_0 = 767.6 \text{ m}^2$.

主楼和网点结构的处理方式有组织排水,而周围部分仅有小部分进行有组织排水,可忽略不计.降雨发生后,部分雨水将会直接流入到城市管网当中,不考虑降雨过程中雨水由于基坑侧渗流汇集到基坑中,计算基坑内部汇集的雨水可以按照式(1)对单位时间基坑内的雨水汇集量进行计算,屋面的径流系数 ψ 为 0.9~1.0,按照 1.0 取值.单位时间基坑内雨水的汇集量为

$$q = q_i S - q_i \sum S_i \psi = 56.18 \text{ m}^3/\text{h}.$$

暴雨发生后,一部分雨水会通过建筑物有组织地排出,其他的雨水将会汇入到基坑内,引起基坑内部水位上升,水位上升高度为 $h_1 = \frac{qt}{nA_0} = 3.51 \text{ m}$,降雨 24 h 后基坑内水位高度约 $h_2 = 6.28 \text{ m}$.

通过上述计算分析可得,在发生暴雨时,如果不采取合理有效的排水措施,基坑内侧的水位可能会达到 6.28 m,高于抗浮设计水位.而基坑内水位的上升,可能会导致地下车库的底板发生开裂等相关问题,因此,需要采取有效的措施进行抗浮加固,从而使建筑物的安全和稳定性得到保证.

3.3 自然排水体系设计分析

对上述工程采用自然排水体系的设计方法,沿基坑周长每隔 30 m 设置一处排水井,则总共应设置 13 处排水井.该工程基坑属于封闭型基坑,滤水层厚度通过式(8)计算.当滤水层渗透系数为 0.03 cm/s 的砂石,坡度为 3%时,滤水层厚度为 2 m 可以将雨水排出.当滤水层所采用的砂石级配更好,孔隙率更大时,滤水层的排水效果会有所提高,例如,选用渗透系数为 0.01 cm/s 的砂石,坡度为 3%时,滤水层厚度为 1 m

可以符合要求.隔水层的厚度取 50 cm.

利用 SEEP/W 取部分自然排水结构进行分析.对上述第 1 种情况,即滤水层渗透系数为 0.03 cm/s 的砂石,坡度为 3%,滤水层厚度为 2 m,隔水层厚度为 0.5 m,基坑长 30 m,深 7 m.考虑边界条件的影响,取隔水层的渗透系数为 $7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.土层上部的降雨量设置为 0.01 m/h ,滤水层的出水口的水头设置为 0 m,滤水层和隔水层的坡度均设置为 3%.有限元模拟结果如图 8 所示.由图 8 可知:在进行降雨的过程中,雨水将会沿着表层土逐渐渗入到滤水层中,由于滤水层存在一定的坡度,因此,雨水将会沿着坡度而逐渐地排出.

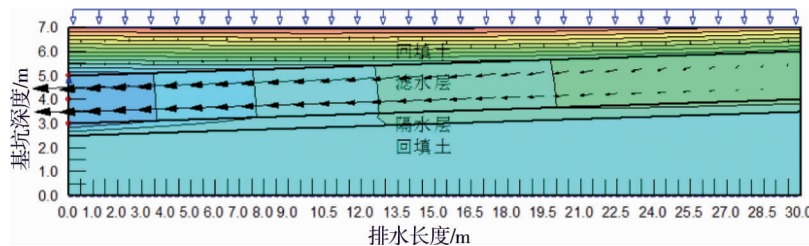


图 8 有限元模拟结果

根据上述分析可知:当隔水层的厚度为 0.5 m,滤水层的厚度为 2 m 时,土层上部的雨水可以渗透到滤水层中并沿着滤水层的坡度而顺利排出.该工程采用所提出的自然排水设计,能够大大地减少雨水在基坑内部的汇集量,使使用过程中基坑内部的抗浮水头得到有效的降低,从而确保基坑内部的抗浮水位在使用过程中保持稳定.

4 结论

1) 提出的新型自然排水体系,即将隔水层以及滤水层设置到基坑内部建筑的周围,可以有组织地排出汇入到基坑内部的水.

2) 不同的基坑形式其滤水层的设计不同.封闭型基坑和底部开放型基坑在设计滤水层时,滤水层的单位面积排水量应不小于降雨量;半开放型基坑中,滤水层的单位面积排水量应不小于降雨量及基坑侧渗流的总和;开放型基坑不需要使用该自然排水体系.在进行隔水层的设计时,需要满足隔水层的渗流量和实际渗流速度远小于滤水层的渗流量.

3) 根据文中设计方法对青岛某塔楼工程进行使用过程中的自然排水设计,并对该设计进行有限元模拟,分析结果可以看出这种新型的自然排水体系可以使使用过程中结构的抗浮设计水头得到有效的降低,从而使基坑内部的抗浮水位在使用过程中保持稳定.

参考文献:

- [1] 刘颖.软土地层复杂环境条件下深基坑施工变形及力学性能研究[D].南昌:南昌大学,2020.
- [2] 吴立,吕程伟,彭国东.天龙公共人防工程人防地下室抗浮设计[J].建筑结构,2020,50(s1):943-947.
- [3] 油新华,何光尧,王强勋,等.我国城市地下空间利用现状及发展趋势[J].隧道建设(中英文),2019,39(2):173-188.
- [4] 倪瑾瑾,李红伟,孟珊,等.富水软土区地下水水压监测技术[J].施工技术,2020,49(s1):199-201.
- [5] 胡正东,刘毓毓.地下结构主动抗浮措施工作机制及工程应用[J].隧道建设,2017,37(1):68-74.
- [6] 李韦.地下建筑结构抗浮设计及措施分析[J].建材与装饰,2017(46):101-102.
- [7] 上海市政工程设计研究总院.室外排水设计规范:GB 50014—2006[S].2006.
- [8] 何成兵.地铁深基坑降排水施工技术的应用[J].智能城市,2020,6(22):145-146.
- [9] 刘杰,谢定松.砾石土渗透稳定特性试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2632-2638.
- [10] 刘帅君,张扬清.降水开挖引起地面沉降的控制措施分析[J].山东农业大学学报,2016,47(5):760-764.
- [11] 聂子奇,张少钦.基坑止水帷幕隔水效应分析[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2020,34(4):77-82.
- [12] 王帅.基坑内地下水渗流机理与抗浮水头取值研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.