

地下建筑抗浮设计新方法——消除浮力法的工程实践与探讨

童建富^{1*}, 夏胜天², 阮陆宇¹, 吴开成³, 沈永良²

(1. 杭州通达集团有限公司建筑设计院, 浙江 杭州 310019; 2. 国昇设计有限责任公司, 浙江 杭州 311200;
3. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028)

摘要: 传统地下建筑抗浮设计大多采用被动抗浮模式, 需要设置大量的抗拔桩或相当数量的压重来平衡基底的水浮力, 不仅建造成本高, 而且对施工和使用期间抗浮水位的取值很敏感, 要求数据比较准确, 当偶遇暴雨引发的洪涝灾害时, 往往容易发生地下室上浮等安全事故。针对传统地下建筑抗浮设计存在成本高、事故多等缺点, 本文提出新的抗浮设计方法——消除浮力法, 通过在基坑周边设置隔水构件, 以及在基底利用反滤层排水, 从而对基底渗流水采用疏堵结合的措施, 有效消除基底水浮力, 该方法属于主动抗浮模式。经过理论分析, 消除浮力法不需要抗拔桩或大量压重就能有效解决地下室抗浮的难题。该方法概念清晰、受力明确、安全可靠、经济合理、简便实用, 具有很好的工程实际应用价值, 并且已经在实际工程中取得了非常好的应用效果。

关键词: 抗浮设计; 抗拔桩; 消除浮力法; 渗流量; 反滤层; 主动抗浮; 被动抗浮

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0043-06

Engineering practice and discussion on a new anti-floating design method of underground buildings

TONG Jian-fu^{1*}, XIA Sheng-tian², RUAN Lu-yu¹, WU Kai-cheng³, SHEN Yong-liang²

(1. The Architectural Design Institute of Hangzhou Tongda Group Co., Ltd., Hangzhou 310019, Zhejiang, China;

2. GuoSheng Design Co., Ltd., Hangzhou 311200, Zhejiang, China;

3. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, Zhejiang, China)

Abstract: The traditional anti-floating method of underground buildings mostly adopts passive anti-floating mode. This requires a large number of uplift piles or a considerable amount of weight to balance the water buoyancy at the bottom of the foundation pit. This traditional method is not only expensive, but also sensitive to the anti-floating water level during construction and running. At the same time, the anti-floating water level needs to be accurately determined. When encountering rainstorms, security incidents such as basement floating are often prone to occur. Due to the disadvantages of high cost and potential risks in the traditional anti-floating method of underground buildings, this paper proposes a new anti-floating design method: the method of eliminating buoyancy. In this method, a water blocking member is arranged around the foundation pit, and a reverse filter layer is used on the base to drain water. A combination of dredging and blocking measures is adopted for the seepage water of the basement to effectively eliminate the buoyancy of the basement water. Different from the traditional method, this method is a kind of active anti-floating mode. After theoretical analysis, the eliminating buoyancy method can effectively solve the problem of basement anti-floating without using anti-uplift piles or a large amount of weight. This method has many advantages, such as cost-saving and reliable, simple and practical, and has good practical application in civil engineering. It has achieved very good results in practical projects.

Key words: anti-floating design; uplift pile; method of eliminating buoyancy; seepage discharge; filtration layer; active anti-floating; passive anti-floating

0 引言

随着地下空间被越来越多地利用,地下建筑抗浮设计的重要性越显突出,既要考虑结构安全,又要兼顾建设成本。目前,抗浮设计通常采用的方法是“抵抗浮力法”,这是一种被动的抗浮方法,抗浮设计水位对抵抗浮力法的效果影响很大,抗浮设计水位取值过高,会大幅增加建设成本;抗浮设计水位取值过低,会给结构带来危险。由于设计单位过度依赖地质勘测单位提供的抗浮设计水位,往往实际水位在暴雨内涝时可能远高于抗浮设计水位,极易造成地下室结构上浮事故,对于地下室结构安全性造成很大风险^[1]。如南方某市连降暴雨,实际水位远高于设计的抗浮水位,造成地下室底部结构的破坏^[2];又如海南某市暴雨引起地下水位升高,造成地下室底板破坏^[3]。采用抵抗浮力法设计的主要措施往往通过增加建筑物的自重,或采用抗拔桩、抗拔锚杆来抵抗水浮力^[4],建设成本非常高,在整个工程造价中的占比较大。

近年来,国内一些专家学者开始探索主动的抗浮方法,包括隔水控压、排水泄压等等。如曹洪等^[5]提出的“地下结构截排减压抗浮概念”,袁帮玉等^[6]提出的“地下室泄水减压抗浮体系”,牛梦娇^[7]提出的“抗排结合的地下工程抗浮关键技术研究”等。但总体来看,在工程中应用还是非常少。为此,本文基于泄压抗浮的原理,提出一种新的抗浮设计方法——消除浮力法,并结合工程实例,对这种新的抗浮方法,从适用性、安全性、经济性等方面进行了具体阐述。

1 新的抗浮设计方法——消除浮力法

1.1 消除浮力法的提出

地下室底板所受的浮力是由地下室底板底渗流水积聚等对地下室底板产生抬升作用的竖向压力^[4]。传统设计通常采用被动的抗浮方法,即利用抗拔桩、抗拔锚杆以及填土压重等措施来抵抗基底的水浮力,由于抗拔桩、抗拔锚杆等抗力效率非常低,往往导致抗浮建造成本非常高,而且由于抗浮控制水位难以精准确定,容易引发工程事故。本文提出的消除浮力法,从消除产生浮力的源头出发,其基本原理就是通过各种措施,避免和消除底板下渗流水的积聚,使地下室底板下处于少水甚至无水

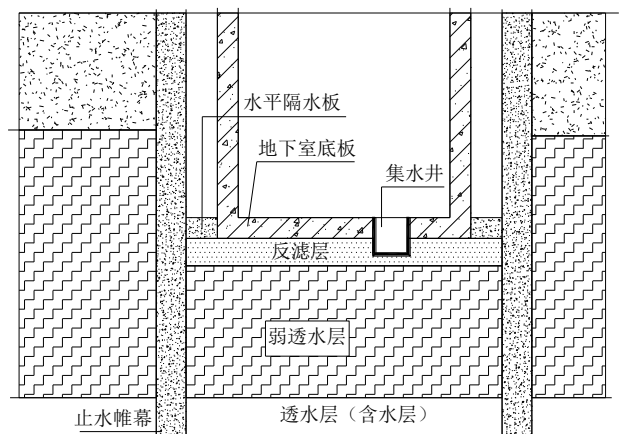
状态,最终达到抗浮的目的。采用这种方法,不仅不需要设置抗力效率低下的抗拔桩,而且由于通过主动消除基底渗流水积聚来消除水浮力,所以不会因为抗浮控制水位不准确而导致抗浮失效。

1.2 地下室底板下水浮力的消除方法

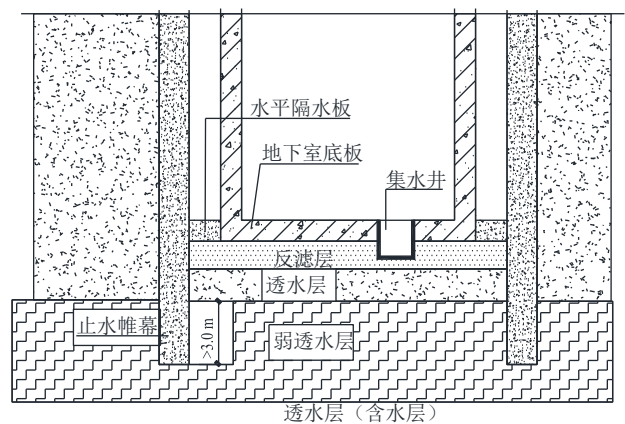
要消除地下室底板的水浮力,就必须有效消除地下室底板下的渗流水,单纯采用隔离的办法或单纯采用排水的办法都存在很大的弊端。为此,借鉴水工专业的相关知识,采用“堵”“导”结合的办法去解决基底渗流水的问题。

(1) 适用条件

该方法主要适用于地下室底板埋置在弱透水层内或底板下一定深度范围内分布有弱透水层,如图1(a)、(b)所示。参照水利工程《碾压式土石坝设计规范》^[8]以及其它水利方面工程经验,弱透水层的渗透系数宜小于 $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$,弱透水层的厚度 B 必须大于 $H_d/4$ (H_d 为弱透水层层底与层顶的水头差),并且不小于 3.0 m。



(a) 底板埋置在弱透水层内



(b) 底板下一定深度范围内分布有弱透水层

图1 基础与基底土的关系

Fig. 1 Relative position of soil and the basement

(2) 堵

要消除地下室底板下的渗流水,首先要设法阻断地下室以外的渗流通道。对于地下建筑,可以利用基坑围护结构的止水帷幕作为竖向隔水构件,堵住基坑外水平渗流水;在地下室外墙与止水帷幕之间设置水平隔板作为水平隔水构件,阻断地表水渗入。这样使基底处于相对封闭状态,大大减少渗流水的来水量,如图1所示。

(3) 导

虽然设置了隔水构件,但并不能完全阻断所有的渗流通道,特别是通过弱透水层,还会有渗流水流向基底,如果不能及时排出,会导致渗流水积聚产生水浮力。在排水的同时,还必须保证基底土的稳定,不能因为排水而导致水土流失。为此,需要在地下室基底设置反滤层,通过设置反滤层,既可以及时将渗流水汇聚到集水井排出基坑外,同时又能保证土体的稳定。

2 消除浮力法设计技术要点

消除浮力法,需要“堵”“导”结合,特别是需要保证基底水的顺利排出,因此,反滤层的设置是非常关键的一环。另外,从适用性角度出发,需要分析承压水引起的土体隆起问题以及渗流水排出量的大小问题。

2.1 反滤层设计

反滤层的主要作用是截土泄水,需满足排水和保土的双重作用。首先是为了保证渗流水能顺利排出,避免产生淤堵;其次,必须阻止土颗粒排出,避免发生流土或管涌。因此,反滤层的设计至关重要,反滤层的构造、施工质量直接影响到抗浮设计的成败。反滤层按其工作条件分为I型反滤层和II型反滤层,根据基底渗流的特点,本文抗浮新方法中,采用的是II型反滤层,反滤层位于被保护土层的上部,渗流方向主要由下向上。反滤层由细砂、粗砂、石子等根据一定级配分层铺设而成,在渗流作用下形成砂拱,任何一层的颗粒都不允许穿过相邻较粗一层的空隙。为了防止局部产生的流土或管涌,需最大限度地降低渗透流速,所以宜采用全断面排水,并铺设土工布,组成复合反滤层,如图2所示。具体做法可参照水利工程《碾压式土石坝设计规范》^[8]以及其它水利方面相关资料。

2.2 土体隆起控制

本文所关注的主要是由承压水所引起的土体隆起,如果承压水头过高或承压水层离基底距离太

近,都会引起土体隆起。抗隆起计算的要点如下:取弱透水层底面处的承压水头为向上的隆起压力,见图3,弱透水层及其以上的土重以及地下室底板自重作为抗隆起抵抗压力。原则上要求向上隆起压力不大于隆起抵抗压力。如果不能满足抗隆起计算要求,需采取适当措施后方可采用本文消除浮力法。具体算法见后面实例。

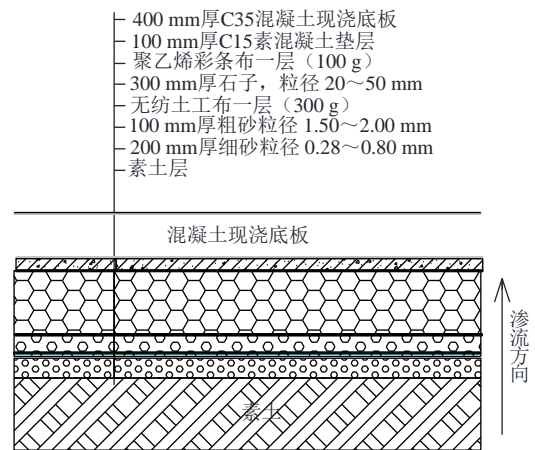


图2 反滤层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anti-filter layer

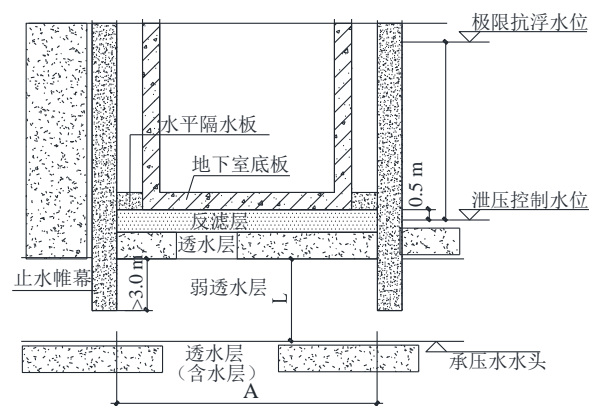


图3 渗水量计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of seepage amount calculation

2.3 地下室基底渗流水量的估算

采用消除浮力法来永久解决地下室抗浮问题,还需要预估基坑底板下的渗流量。计算渗流量,一方面是出于经济性考虑,如果每天需要排出的渗流量过大,耗费的电费会比较多,经济性就有所影响。另一方面,如果每天需要排出的渗流量过大,会引起周边地下水位明显下降,对周边环境会有所影响。

渗流量的估算,通常采用达西定律公式来计算^[9-10]。

$$Q = kAi \quad (1)$$

式中: Q 为单位时间渗流量, m^3/d ; k 为渗透系数,

m/d, 根据地勘报告进行确定; A 为过水断面, m^2 , 在本方法应用中, 就是基坑的水平面积; $i=h/L$ 为水力坡度, h 为总水头损失, 在本方法应用中, 就是弱透水层底面和顶面的水头差, L 为渗流路径长度, 在本方法应用中, 就是基坑底下弱透水层的厚度, 如图 3 所示。

3 工程实例

3.1 工程概况

虹软视觉人工智能产业化大楼项目位于杭州

市滨江区滨兴路与江淑路交叉口, 建筑用地面积 $8\,015\text{ m}^2$, 总建筑面积为 $56\,962.13\text{ m}^2$, 结构总高度 103.1 m , 地上 20 层。其中地下部分建筑面积 $20\,894.63\text{ m}^2$, 地下 4 层 (含夹层), 总埋深 15.75 m (底板面标高 -15.20 m), 工程地质参数见表 1。

图 4 为该项目所在场地的地质剖面图, 基底坐落在 $\textcircled{3}_2$ 淤泥质粉质黏土层上, 该层土基底以下最小厚度 13.09 m , 水平渗透系数 $k_H=2.1\times 10^6\text{ cm/s}$, 垂直渗透系数 $k_V=9.7\times 10^7\text{ cm/s}$, 是一层很好的隔水层, 故对采用消除浮力法抗浮设计非常有利。

表 1 基坑支护设计岩土工程参数表

Table 1 Geotechnical engineering parameter foundation pit support design

层号	层名	w/%	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$k_H/(\text{cm}/\text{s})$	$k_V/(\text{cm}/\text{s})$	c/kPa	$\phi/(\text{°})$
$\textcircled{1}_0$	填土	—	19.00	—	—	—	—
$\textcircled{1}_1$	砂质粉土	30.7	18.49	2.2×10^5	1.8×10^5	4.6	25.4
$\textcircled{1}_2$	砂质粉土	30.5	18.70	2.4×10^5	1.5×10^5	4.8	25.9
$\textcircled{2}_2$	砂质粉土夹粉砂	26.9	19.00	1.1×10^4	8.3×10^5	3.3	25.8
$\textcircled{3}_2$	淤泥质粉质黏土	42.0	17.03	2.1×10^6	9.7×10^7	12.2	7.8
$\textcircled{4}_2$	粉砂夹砂质黏土	26.3	18.92	—	—	4.7	25.0
$\textcircled{4}_3$	砾砂	—	—	—	—	—	—

注: 表中固结快剪 c 、 ϕ 值未进行折减, 设计人员可根据实际工况进行使用。

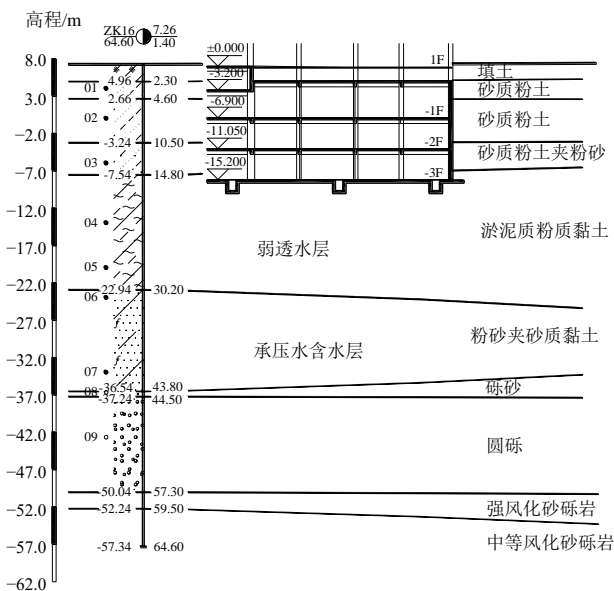


图 4 地质剖面图

Fig. 4 Geological profile

3.2 渗透水量计算

本工程弱透水层底承压水水头为 21.99 m , 弱透水层层顶即基板底水位为 0 , 则渗透水的总水头损失 $h=21.99\text{ m}$, 弱透水层即 $\textcircled{3}_2$ 淤泥质粉质黏土层最小厚度 $L=13.09\text{ m}$ 。垂直渗透系数 $k_V=9.7\times$

$10^7\text{ cm/s}=8.38\times 10^4\text{ m/d}$, 基坑底面积 $A=6\,166.60\text{ m}^2$, 根据达西定律公式计算。

渗水量为:

$$Q=k_V Ai \quad (2)$$

水力坡降为:

$$i=h/L=21.99/13.09=1.68 \quad (3)$$

估算最大排水量为:

$$Q=8.38\times 10^4\times 6\,166.60\times 1.68=8.64\text{ m}^3/\text{d} \quad (4)$$

为了说明基坑周边水位起伏对排水量的影响, 假设抗浮水位抬高 2.0 m 。则渗透水的总水头损失 $h=23.99\text{ m}$ 。

水力坡降为:

$$i=\frac{h}{L}=\frac{23.99}{13.09}=1.83 \quad (5)$$

估算最大排水量为:

$$Q=8.38\times 10^4\times 6\,166.60\times 1.83=9.41\text{ m}^3/\text{d} \quad (6)$$

抗浮水位抬高 2.0 m 后, 每天估算总排水量增加为:

$$9.41-8.64=0.77\text{ m}^3/\text{d} \quad (7)$$

从以上各项数据比较可知, 采用本文抗浮新方法, 抗浮控制水位抬高 2.0 m, 只需要每天排水量增加 0.77 m³, 其它均无影响。若采用常规抗浮方式, 抗浮水位抬高 2.0 m 后, 基底水浮力增大了 20 kN/m³, 对整个地下室而言, 需要增加 6 166.6×20=123 332 kN 的抗浮力, 若采用 32 m 长, 800 mm 直径的钻孔灌注桩作为抗拔桩, 约需要增加 88 根抗拔桩, 否则就不安全了。

3.3 坑底土抗隆起稳定性验算

抗隆起计算公式为:

$$(D \times \gamma_s + h \times \gamma) / (h_w \times \gamma_w) > K_w = 1 \quad (8)$$

式中: D 为承压含水层顶面至基板底的土层厚度, 本项目为 13.09 m; γ_s 为承压含水层顶面至基板底土层的平均重度, 取 17 kN/m³; h 为基础底板厚度, 本项目为 500 mm (含面层); γ 为混凝土容重; h_w 为承压含水层顶面的压力水头高度, 本项目为 21.99 m; γ_w 为水的重度, kN/m³; K_w 为抗承压水稳定安全系数。

$$D \times \gamma_s + h \times \gamma = 13.09 \times 17 + 0.5 \times 25 = 235.03 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

$$h_w \times \gamma_w = 21.99 \times 10 = 219.9 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

$$K_w = 235.03 / 219.9 = 1.07 > 1.0 \quad (11)$$

满足设计要求。

3.4 主要构造做法

(1) 底板及反滤层做法

如采用常规抗浮设计, 4 层地下室底板厚度至少在 850 mm 以上。本工程 4 层地下室由于采用了消除浮力法, 因此仅需要根据构造要求设置厚度为 400 mm 的钢筋混凝土底板。

另外在底板下设置 II 型反滤层。即向下依次设置 300 mm 厚度的碎石层、100 mm 厚度的粗砂层和 200 mm 厚度的细砂层, 其间设 1 层无纺土工布。

(2) 集水井做法

根据计算的每天渗透水量, 在地下室底板布置若干集水井, 部分可与地下室其它集水井合用。在集水井四周布置一定数量的不锈钢管, 管壁开孔若干, 孔径 6 mm, 并做好保护。不锈钢管要求伸入石子层不小于 500 mm, 如图 5 所示, 图 6 为集水井实样。

3.5 基底检测

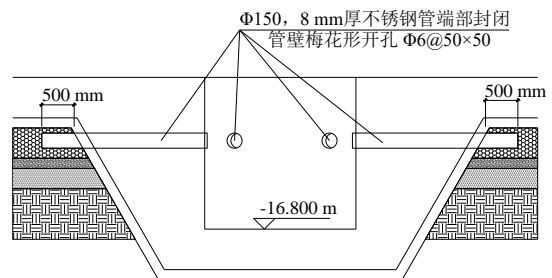
(1) 为了监控消除浮力法的实际效果, 在地下室底板的板面板底埋置了 60 个应力计, 并在基板底布置了 15 个土压力盒和 5 个水压力计。监测基坑回填后到主体结顶期间, 地下室底板的受力情况

以及基底的水压、土压情况。

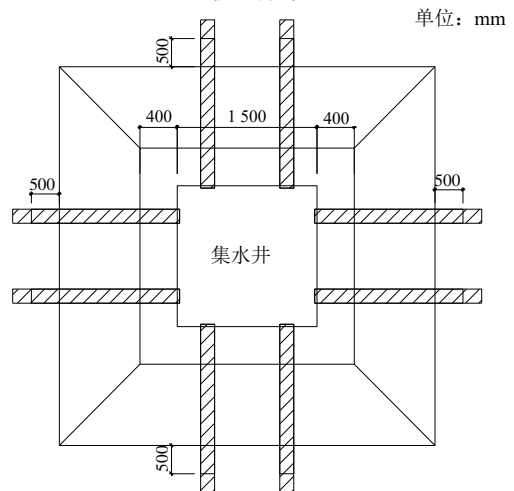
根据监测数据, 基坑底板浇筑完成后, 基坑底板应力、孔隙水压力和基底土压力一直保持在比较平稳的状态, 未出现单日变化量及累计变化量报警情况。

(2) 基底排水量情况

基坑底板浇筑完成后, 地下室集水井开始排水, 统计每天的排水量。在地下室后浇带封闭之后, 各集水井总排水量基本趋于稳定, 每天总排水量稳定在 6~7 m³ 左右, 而且排出的是清水, 说明: a) 反滤层作用有效, 没有流土现象发生; b) 基底的渗水量非常少, 每天排水所需耗电 1 kW·h 不到。



(a) 泄压抗浮集水井剖面



(b) 泄压抗浮集水井平面

图 5 泄压抗浮井构造

Fig. 5 Structure of drainage well



图 6 集水井实样

Fig. 6 Photo of drainage well

3.6 造价节约情况

虹软视觉人工智能产业化大楼项目, 如果按常规方法进行抗浮设计, 一般会采用钻孔灌注桩作为抗拔桩, 若采用 800 mm 直径的钻孔灌注桩作为抗

拔桩,根据地质勘察报告,桩长需要取 32 m,共需要 208 根桩,基础底板厚度至少在 850 mm 以上。抗拔桩及基础底板共需造价 1 197 万元。

采用消除浮力法后,不仅取消了所有抗拔桩,

基板厚度也降至 400 mm,另外需增加反滤层的造价,所有费用合计为 498 万元。

采用消除浮力法后,共节约造价共计 699 万元,具体经济指标见表 2。

表 2 经济指标分析
Table 2 Economic analysis

序号	项目名称	分项	单位	工程数量	综合单价/元	小计/元	合计/万元	
常规抗浮方法	850 筏板	抗拔桩	钻孔灌注桩	根	208	30 644.25	6 374 004.00	637
			钢筋	t	298	4 620.98	1 377 052.04	
			混凝土	m ³	4 420	682.50	3 016 650.00	
			土方	m ³	4 940	180.00	889 200.00	
			垫层	m ³	520	616.07	320 356.40	
消除浮力法	400 筏板		钢筋	t	141	4 620.98	651 558.18	450
			混凝土	m ³	2 080	682.50	1 419 600.00	
			土方	m ³	5 720	180.00	1 029 600.00	
			垫层	m ³	520	616.07	320 356.40	
			300 g 土工布两道	m ²	5 200	9.10	47 320.00	
			300 mm 碎石	m ³	1 560	320.32	499 699.20	
			100 mm 厚粗砂、 200 mm 厚中细砂	m ³	1 560	327.60	511 056.00	
			地梁	t	0.351	4 620.98	1 621.96	
				m ³	30	682.50	20 475.00	
			咨询费	项	1	—	—	
	TRD 拔型钢后注浆	项	200	1 404.04	28 080.80	28		
泄压抗浮后节约造价:							699	

4 结 论

本文所提出的消除浮力法,是一种主动的抗浮设计方法,相较于被动的抵抗型抗浮方法,不仅具有非常好的经济性,而且具有更好的安全性和可操作性,如果地基土条件合适,地下建筑采用消除浮力法,具有很大的推广价值。

(1) 经济性更好。采用消除浮力法之后,不仅可以取消大量的抗拔桩,缩短工期,而且可以大大减小地下室底板厚度,因此可以大幅度地节省造价。

(2) 安全性更好。从消除浮力法的原理可知,只要及时排出基底的渗流水,地下室底板就不受浮力。根据达西定律公式可以知道,只要弱透水层具有一定的厚度,并且土的渗透系数满足前述要求,地下室周边土中地下水水头的起伏对基底渗水量影响很小,即使渗水量有所增加,只要能及时排出,对抗浮安全也没有影响。因此,采用消除浮力法抗

浮效果不受暴雨内涝等自然灾害的影响,更不会因为抗浮控制水位取值不准确而导致抗浮破坏,抗浮效果安全可靠,保证性更强。

(3) 施工简便。消除浮力法施工,只要严格按照级配设计要求做好反滤层,做好各项隔水、排水构造措施,就能确保抗浮无忧。

参考文献

- [1] 朱炳寅, 娄宇, 杨琦. 建筑地基基础设计方法及实例分析[M]. 第二版. 中国建筑工业出版社, 2013.
ZHU Bing-yin, LOU Yu, YANG Qi. Design Method and Case Analysis of Building Foundation[M]. 2nd Edition. China Building Industry Press, 2013.
- [2] 汪四新, 屈娜. 某坡地建筑地下室抗浮问题绿色技术处理方法[J]. 建筑技术, 2012, 43(10): 925-928.