

# 关于《建筑工程抗浮技术标准》的理解与思考

朱东风<sup>1,2</sup>, 罗赤字<sup>1</sup>, 李剑锋<sup>1</sup>

(1. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广州 510010; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640)

**摘要:**针对行业标准《建筑工程抗浮技术标准》JGJ 476—2019 中的一些问题提出理解与思考。对于抗浮设计等级为甲级的工程,该标准增加了较多的工作内容,使用期内的地下水位预测是一个难点,开展基础数据积累和建立地下水数值分析模型是一种可行的方式,该标准将抗浮设计等级与基础设计等级挂钩并不完全合适。除整体抗浮稳定验算外,尚需对地下结构薄弱环节进行“单元抗浮稳定验算”,并与底板强度和变形验算结合考虑。在承压条件下,地下室底板大部分区域的水头值与承压水水头值相同。抗浮锚杆筋体的截面计算公式存在概念不清晰的问题。采用主动抗浮方法时,应充分考虑地层、环境的适应性,对排水盲沟的保土防淤、渗流计算及截水帷幕的耐久性问题应进行更深入的研究。

**关键词:**抗浮设计等级;抗浮安全系数;抗浮锚杆;主动抗浮法

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2022)02-0628-07

## Understanding and Thinking about “Technical Standard for Building Engineering against Uplift”

Zhu Dongfeng<sup>1,2</sup>, Luo Chiyu<sup>1</sup>, Li Jianfeng<sup>1</sup>

(1. Guangdong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, P. R. China;  
2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

**Abstract:** In view of some problems in the industrial standard "Technical standard for building engineering against uplift (JGJ 476—2019)", this paper presents understanding and thinking. For projects with anti-uplifting design grade A, this standard adds a lot of work content, among which the prediction of underground water level in the service period is a difficulty. The accumulation of basic data and the establishment of groundwater numerical analysis model are feasible approaches. It is not entirely appropriate for the standard to link the anti-uplifting design grade with the foundation design grade. In addition to the overall anti-uplifting stability checking calculation, the "unit anti-uplift stability checking calculation" for the weak parts of the underground structures should also be carried out, which should be considered in combination with the strength and deformation check of the floor. Under the condition of artesian water, the hydraulic head value of most areas of basement floor is the same as that of artesian water. The concept of cross section calculation formula of anti-uplifting bolt reinforcement is not clear. When adopting the active anti-uplifting method, the adaptability of stratum and environment should be fully considered. The problems of soil retention and clogging performance, seepage calculation of the drainage blind ditch and the durability of cutoff wall should be studied more deeply.

**Keywords:** anti-uplifting design grade; anti-uplifting security coefficient; anti-uplifting anchor rod; active anti-uplifting method

收稿日期: 2021-10-07 (修改稿)

作者简介: 朱东风(1984—), 男, 湖北宜昌人, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程、地下工程领域的科研与设计工作。

E-mail: dongfengzhu@163.com

通讯作者: 李剑锋(1979—), 男, 广东阳山人, 博士, 高级工程师, 主要从事建筑结构和工程管理领域的研究工作。

E-mail: ljfeng@gdadri.com

基金项目: 国家自然科学基金(51978282); 广东省自然科学基金(2018A030313383, 2020A1515010583)

0 引言

行业标准《建筑工程抗浮技术标准》(JGJ 476—2019)已经于 2020 年 3 月 1 日颁布实施(下文简称《抗浮标准》),其目的是提高广大工程技术人员对地下结构抗浮问题的重视程度,并将工程抗浮提高到防灾减灾的层面进行处理,为抗浮设计和抗浮事故处理提供指导性意见。《抗浮标准》对以往工程中采用的抗浮方法和措施进行了汇总和归纳,也提出了新的抗浮手段,在当前地下空间往深大方向发展、抗浮工程事故日益增多的背景下,该

标准的出台无疑是及时的,但是由于是在抗浮领域首次颁布全国性的技术标准,其内容也有一些争议之处。这里就以下几个方面提出一些理解与思考。

1 抗浮设计等级

《抗浮标准》将地下结构抗浮工程分为甲级、乙级和丙级 3 个等级,并分别赋予不同的抗浮稳定安全系数,以满足不同的安全性和经济性目的<sup>[1]</sup>。对于抗浮设计等级为甲级或水文地质条件复杂的乙级工程,该标准有更严格的规定,现将详细要求汇总于表 1。

表 1 不同抗浮设计等级对应的工作要求

Table 1 Work requirements corresponding to different anti-uplifting design grades

序号	条文 编号	条文内容	抗浮设计等级			
			甲级	复杂 乙级	一般 乙级	丙级
1	3.0.5、4.1.1	抗浮专项勘察	√	√	×	×
2	3.0.14、7.1.3	当采取控制地下水位或联合方法抗浮,应采取水位监测和维护措施	√	√	√	×
3	3.0.14	当采取控制地下水位或联合方法抗浮,抗浮构件应采取内力和变形监测措施	√	×	×	×
4	4.2.1	进行抽水试验	√	√	×	×
5	4.2.3	场地设置长期水位监测孔,并监测满一个水文年	√	√	×	×
6	5.1.3	施工期和使用期最高地下水位预测,并提供经审查合格的咨询报告	√	×	×	×
7	5.2.4	提供两种以上的水位预测分析计算方法	√	×	×	×
8	6.1.4	抗浮治理方案宜进行专项论证	√	√	×	×
9	6.5.3	抗浮治理时,宜选择预应力抗浮锚杆	√	√	√	×
10	6.5.3	抗浮治理时,地基土软弱且变形控制严,宜选用抗浮桩	√	√	√	×
11	7.1.4、7.1.5	由抗拔静载试验确定抗拔锚杆、抗拔桩的抗浮承载力	√	√	×	×
12	7.5.5	由现场静载试验确定锚杆抗拔承载力设计参数	√	×	×	×
13	7.5.8	抗浮锚杆锚固体不允许出现裂缝,且锚固体不产生拉应力	√	×	×	×

注:1.“√”表示需要,“×”表示不需要;2.“复杂乙级”表示水文地质条件复杂的抗浮工程。

从表 1 看到,抗浮设计等级为甲级的新建工程需要开展抗浮专项勘察、水位监测、抽水试验、地下水位预测咨询等工作,这对勘察工作提出了更高的要求。由于水位监测需要持续一个水文年,即覆盖整个枯水期和丰水期,使得勘察工作不能再作为一个短期行为,需要投入更多人力和时间。地下结构使用期内的地下水位预测分析是一个难点,由于地下水位的变化易受气候、工程活动、社会发展等因素的影响,准确预测未来使用期内的最高地下水位难度较大。例如,在华北平原地区,由于受南水北调工程的影响,目前地下水位在缓慢回升,但由于社会发展导致用水量也在增加,未来地下水位是否稳步回升尚未可知<sup>[2]</sup>。从目前的研究和工程经验

来看,解决地下水位预测难题可以从以下几个方面入手:

(1)在工程建设活动频繁的城市地区,开展地下水位监测工作,为水位预测积累基础数据。例如,对大型地下空间设施及其附近区域的地下水位持续观测,获取地下结构物对地下水的阻隔作用及规律。

(2)将城市地下水的管理纳入城市规划高度,统一使用。

(3)建立城市地下水数值分析预测模型,这种方式已在北京地区的地下结构抗浮水位分析中得到了实际应用。

在抗浮设计等级的判定上,地基基础设计等级

有较大影响,根据《抗浮标准》第 3.0.1 条,地基基础设计等级为甲级的工程抗浮设计等级也为甲级。根据这个要求,30 层以上的高层建筑、位于复杂地质条件及软土地区的二层及二层以上地下室的基坑工程、开挖深度大于 15 m 的基坑工程、周边环境条件复杂且环境保护要求高的基坑工程<sup>[3]</sup>,其抗浮设计等级均为甲级,从地下结构安全和功能上考虑,这种关切是合适的,但从抗浮需求上来说,抗浮设计等级与地基基础设计等级并不完全匹配,地下结构的抗浮安全性除与浮力有关,还与上部荷载有关。某些超高层结构地下部分深度大,但其使用期间的抗浮需求并不大,因为仅靠自身荷重完全可以抵消浮力,产生较大的抗浮稳定安全系数,无需额外的抗浮措施,它们的抗浮需求仅表现在施工期间,若采用降水措施也能满足抗浮要求。因此,若兼顾经济性及避免表 1 中所列的额外工作量,可将这部分工程从甲级中排除。鉴于以往较多的抗浮事故出现在施工期间,比如顶板覆土不及时、提前停止降水及侧壁肥槽回填质量较差等原因,且施工期间抗浮安全富裕较小,仅能依靠结构自重和桩/锚抗浮措施,因此建议施工期间的抗浮稳定安全系数可适当提高。

## 2 抗浮稳定验算

《抗浮标准》第 6.1.2 条首次对整体抗浮稳定性验算、区域整体抗浮稳定性验算进行了划分。划分的依据是上部结构荷载不同分布区,可以理解为上部结构荷载分布不均匀、减层、大开洞等荷重变化大的不同区域,或以变形缝、抗震缝、沉降缝或后浇带为界的区域,或不同底板刚度、不同基础形式划分的区域。

上述划分的目的是为了确定整体抗浮稳定验算的区域,然而在地下结构抗浮失效的事故中,大部分案例并非发生整体上浮,而是发生底板局部隆起变形和开裂,部分梁、柱、墙构件损坏<sup>[4-5]</sup>,某些局部范围的锚杆失效。这说明,在进行整体抗浮稳定验算的同时,尚需要对某些薄弱环节进行局部抗浮稳定验算<sup>[6-7]</sup>,也可称为单元抗浮稳定验算。例如,对单根锚杆/抗浮桩控制范围内的结构进行抗浮稳定验算,对水浮力作用下锚固点间的底板隆起变形量和裂缝宽度进行控制。当采用抗浮锚杆时,因锚杆产生锚固力可能会产生较大变形,此时底板也随之产生隆起变形,验算时应充分考虑这种

影响。

## 3 承压条件下浮力计算

《抗浮标准》第 6.2.2 条规定地下结构底板下有承压水时,承压水水头产生的浮力标准值按下式计算:

$$F_{fc} = p_w - \gamma_m h_c \quad (1)$$

$$F_{fc} = 0 \quad (p_w \leq \gamma_m h_c) \quad (2)$$

式中: $F_{fc}$  为承压水水头产生的浮力标准值; $p_w$  为承压水水头压力值; $\gamma_m$  为承压水层顶面与地下结构底板底面之间土层的平均浮重度; $h_c$  为承压水层顶面与地下结构底板之间的土层厚度。式(1)和式(2)表明,位于承压水层上部弱透水层中的地下结构所受的浮力为承压水压力值扣除底板下弱透水层的浮重量。

为了验证上述算法,这里设计两个算例(算例 1 和算例 2)进行有限元分析,两个算例的计算模型如图 1 所示,计算软件采用剖面二维有限元程序<sup>[8]</sup>。算例 1 中,填土层水头  $h_0 = 12$  m,承压水层水头  $h_q = 7$  m;填土层厚 3 m,渗透系数  $k$  为  $1 \times 10^{-4}$  cm/s;黏土层厚 6 m, $k$  为  $1 \times 10^{-5}$  cm/s;砂土层厚 3 m, $k$  为  $1 \times 10^{-3}$  cm/s。地下室宽 100 m,进入黏土层 3 m,黏土饱和重度  $19$  kN/m<sup>3</sup>。模型底部边界不透水,含水层两端按定水头边界考虑。算例 2 中,承压水层水头  $h_q = 15$  m,其他参数与算例 1 完全相同。

从两个算例的计算结果来看,地下室底板中部大部分区域的水头值与承压水层的水头相同,而四周边跨小范围因渗流的影响而水头不同。具体地,存在向下渗流时,四周水头高于中部;存在向上渗流时,四周水头低于中部。

地下室底板下的水压力值计算结果见表 2,这里也列出了依据《抗浮标准》条文说明第 6.2.5 条中表 2 序号 7、序号 8 计算公式的结果,并给出文献<sup>[8]</sup>关于地下室四周边跨水头的计算结果。

表 2 地下室底板压力值计算结果比较(单位:kPa)

Table 2 Comparison of calculation results of basement floor pressure (unit: kPa)

	地下室四周				地下室中部		
	文献 [8]	抗浮 标准	条文 说明	有限 元	抗浮 标准	条文 说明	有限 元
算例 1	35	13	35	26	13	35	10

续表							
	地下室四周				地下室中部		
	文献 [8]	抗浮 标准	条文 说明	有限 元	抗浮 标准	条文 说明	有限 元
算例 2	90	93	75	81	93	75	90

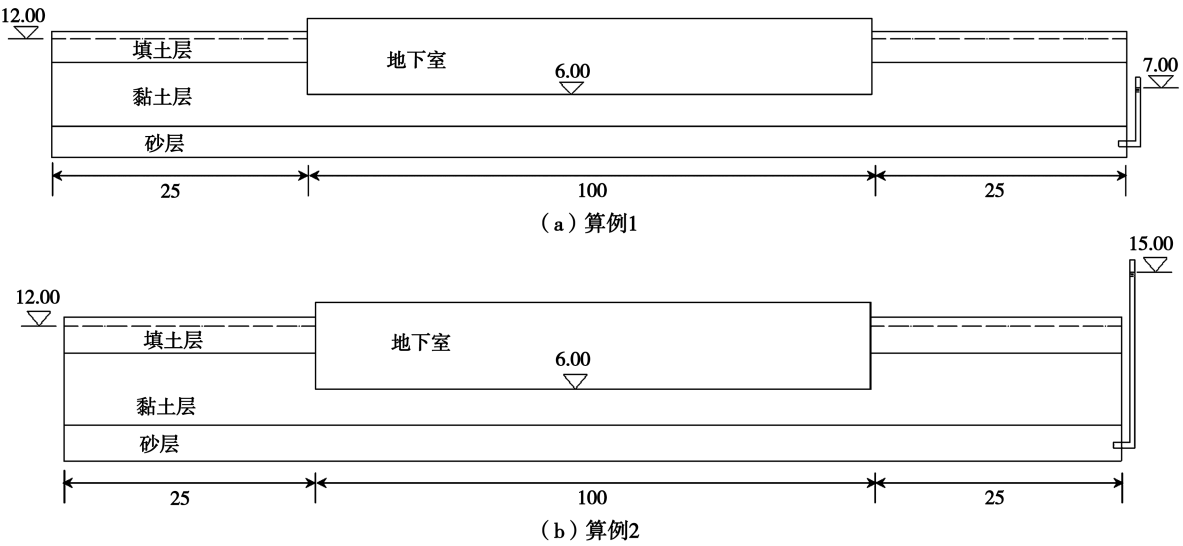


图 1 计算模型示意图(单位:m)  
Fig. 1 Schematic diagram of calculation model (unit: m)

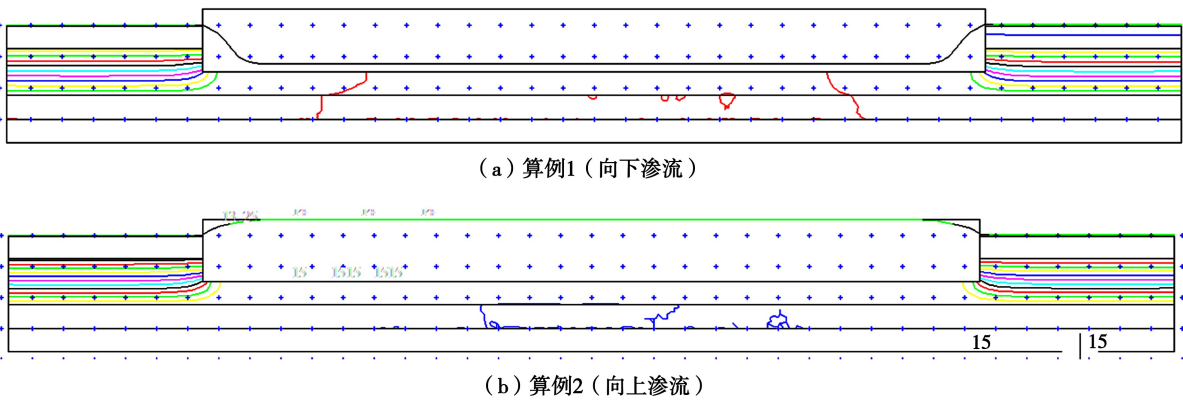


图 2 水头等值线图  
Fig. 2 Contour diagram of hydraulic head

可以看到,《抗浮标准》第 6.2.2 条的公式和有限元法在地下室中部大部分区域的计算结果是一致的,微小的计算差异是由于黏土隔水层的饱和重度取值造成的,而条文说明第 6.2.5 条的方法在算例 1 中结果偏大,在算例 2 中结果偏小,其公式合理性有待商榷。在实际工程中,底板下往往存在大量勘探孔或桩锚孔击穿黏土隔水层,成为承压水层向上渗流的通道,而由于大面积底板的阻隔作用,致使底板中部大部分区域的水头值最终与承压水层内的水头值保持一致。对于算例 1 有向下渗

流的情形,《抗浮标准》第 6.2.2 条在四周边跨的计算结果偏小,但考虑到边跨部分侧摩阻力的安全储备,总体抗浮安全尚可控;对于算例 2 有向上渗流时,《抗浮标准》第 6.2.2 条和文献[8]在四周边跨部分的计算结果略大,但由于边跨范围有限,对经济性影响不大。

可见,当地下室面积较大时,中部大部分区域的浮力由承压水层控制。另外,对于黏土中的水浮力是否需要折减的问题,目前尚存在争议,从安全角度考虑,该标准未列入考虑浮力折减的计算公



式,仅在条文说明讨论,以供参考。

#### 4 抗浮锚杆

为了提高耐久性,《抗浮标准》第7.5.8条规定,对于抗浮设计等级为甲级的工程,抗浮锚杆锚固体不允许出现裂缝,在荷载效应标准组合下锚固体中也不应产生拉应力。这意味着拉力型锚杆将不能在抗浮等级为甲级的工程中使用,例如以往常用的全黏结钢筋锚杆,而只能使用压力型锚杆。更具体地,仅能选择压力型或压力分散型预应力锚索,其在边坡工程中较为常用,而用于地下结构抗浮的工程案例较少。另外,由于锚头防水构造以及施工工艺不成熟而使设计人员产生困扰,目前可以参考的做法仅见于深圳大学张道真教授的报道<sup>[9]</sup>。

《抗浮标准》第7.5.6条关于锚杆筋体截面面积的计算公式为:

$$A_s \geq \frac{K_t \cdot N_t}{f_y} \quad (3)$$

式中: $A_s$ 为锚杆筋体截面面积; $K_t$ 为锚杆筋体抗拉安全系数,取为2.0; $N_t$ 为荷载效应基本组合下锚杆承担的荷载标准值; $f_y$ 为钢绞线、钢筋抗拉强度设计值。

根据清华大学李广信教授的观点,涉及岩与土的设计与验算,一般采用安全系数表达,而涉及钢材、混凝土与砂浆的设计和验算时,一般采用分项系数表达<sup>[10]</sup>。例如,在计算锚杆截面面积时,《建筑地基基础设计规范》(GB5007—2011)中式(9.6.5)<sup>[3]</sup>、《建筑基坑支护技术规范》(JGJ120—2012)中式(4.7.6)<sup>[11]</sup>、《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)中式(4.6.6)和式(4.6.8)<sup>[12]</sup>符合分项系数表达的要求。《抗浮标准》显然采用了安全系数表达,以描述荷载和抗力的不确定性,这与上述规范不一致。另外,式(3)中抗力 $f_y$ 取钢绞线、钢筋抗拉强度设计值,该值包含了抗力分项系数 $\gamma_R$ ,即将安全系数表达与分项系数表达混用。这里若采用安全系数表达,应采用钢绞线、钢筋抗拉强度标准值。广东省标准《建筑工程抗浮设计规程》(DBJ/T-125—2017)亦采用了安全系数表达,但钢绞线、钢筋抗拉强度取标准值,见该规范中式(7.2.1)一式(7.2.4)<sup>[13]</sup>。

#### 5 主动抗浮方法

《抗浮标准》引入了3种主动抗浮方法(即排

水减压抗浮法),分别是排水限压法、隔水控压法和泄水降压法。这3种方法并不相互独立,可以联合使用,为抗浮方法的选择提供了灵活性。该标准中采用的汇水措施为碎石层和排水盲沟,排水措施为集水井和降水井,保土防淤措施采用土工布,需要截水时,采用地下连续墙等永久隔水帷幕。相比被动抗浮法,主动抗浮法在经济性和工期方面优势明显,但仍有以下几个问题需要深入探讨。

(1)地层、环境的适应性问题。在整个地下结构的使用期内不间断排水,是否使地基产生较大的变形而影响周边其它建构筑物,是采用主动抗浮法首先需要考虑的问题,特别是在道路、管线密布的城市环境中。一般在软土地基中排水易产生较大变形,应谨慎使用,然而也有成功的案例,如上海金茂大厦裙楼工程<sup>[14]</sup>。因此,在软土地区应用主动抗浮法值得进一步研究。在强透水地层,排水和补水的速度较快,地基不易变形,但较大的出水量使得土体中水力坡降较大,土颗粒易启动并聚集而产生淤堵。在富水粉细砂地层,土体极易被扰动而发生流动,造成管路堵塞,因此也应谨慎排水。

(2)排水盲沟的保土防淤问题。排水盲沟被广泛用作汇水设施,如果因淤堵而失效,将导致抗浮失败。这已有先例,常用的疏导措施是采用高压水反冲洗,但效果往往不佳。能够降低盲沟淤堵风险的对策有:①严格控制盲沟出水量,降低管周土体中的水力坡降,防止土颗粒启动和聚集。②对于结构不稳定土体(级配曲线下凹且尾部较长),不建议采用土工布作为滤层。原因是这类土体中含有不受骨架颗粒约束的细粉粒(粒径小于0.075 mm),易随水流运移<sup>[8]</sup>,又因土工布孔眼较细而被拦截堆积,造成透水效率下降。可替代的方式是采用中粗砂作滤层。

(3)隔水帷幕的耐久性问题。当地下结构采用截水措施时,常用的隔水帷幕形式有钢筋混凝土地下连续墙和水泥土搅拌桩/墙。地下连续墙施工质量和整体性较好,使用期限内的截水效果可以保证;但水泥土搅拌桩/墙处于腐蚀性环境中时,存在材料劣化、冲蚀导致透水性增加的问题。另外,由于施工工艺缺陷而产生桩间缝隙,当墙体后方回填效果不佳时,渗漏水将难以改善,长期的截水效果将得不到保证<sup>[15]</sup>。

(4)主动抗浮方法的渗流计算问题。采用主动抗浮方法时,场地的渗流计算一般采用数值方法,来获得总流量、底板水头分布数据,但缺少理论

或经验公式予以校核或估算。对于排水盲沟,目前仅《公路排水设计规范》(JTG/TD33—2012)提供了流量的经验算法<sup>[16]</sup>。因此,提出主动抗浮方法渗流分析时的简化算法供工程师使用十分必要。

## 6 其他问题

《抗浮标准》的一些其他问题如下:

(1)第4.1.2条中“抗浮工程勘察范围不应小于场地范围或预计地下结构底板埋置深度2倍宽度范围”,这里“2倍宽度范围”应为“2倍深度范围”。

(2)第5.3.4条第3款“不同竖向设计标高分区地下水可向下一级标高分区自行排泄时,为下一级标高区高程”,其条文解释为:在山区坡地地形条件下,当排水系统完整,对于台阶状地下室,可将上一台阶的抗浮设防水位取为下一台阶的室外地坪标高。对于此种情况,广东省标准《建筑工程抗浮设计规程》DBJ/T-125—2017提供了简化算法和算例可供参考<sup>[13]</sup>。

(3)图6.1.1中10和11的注释应互换。

(4)第6.3.5条中关于地下结构侧摩阻力的计算应注意,当地下结构外墙外侧铺设防水卷材时,例如地铁车站,其侧摩阻力值应重新论证。

(5)第7.7.3条中“既有截排水系统不满足要求,含水层渗透性较差的既有工程宜采用排水限压法治理”,当含水层为渗透性较差的软土层时,使用排水限压法应充分论证。

(6)图7.7.6泄水降压系统中的出水管直径较小,适用于流量较小的场地,对于强透水大流量场地,应加大管径,否则管端坡降较大,易产生淤堵。

## 7 结论

对于《抗浮标准》,本文提出如下几点结论:

(1)抗浮设计等级为甲级的工程新增了较多的工作内容,其中地下水位预测工作存在困难,目前可以开展基础数据积累和建立数值分析模型工作,将抗浮设计等级与基础设计等级挂钩存在不合理之处。

(2)除整体抗浮稳定验算外,尚需对地下结构薄弱环节进行局部甚至是“单元抗浮稳定验算”,并与底板强度和变形验算结合考虑。

(3)在承压条件下,地下室底板大部分区域的水头值与承压水水头值相同。

(4)抗浮锚杆筋体的截面计算公式存在概念

不清晰的问题。

(5)采用主动抗浮方法时,应充分考虑地层、环境的适应性,对排水盲沟的保土防淤、渗流计算及截水帷幕的耐久性问题应进行更深入的研究。

## 参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程抗浮技术标准(JGJ 476—2019)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for building engineering against uplift (JGJ 476—2019)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2019. (in Chinese))
- [2] 曹文庚, 杨会峰, 高媛媛, 等. 南水北调中线受水区保定平原地下水质量演变预测研究[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 924-935. (Cao Wengeng, Yang Huifeng, Gao Yuanyuan, et al. Prediction of groundwater quality evolution in the Baoding Plain of the SNWDP benefited regions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, published online, 2020, 51(8): 924-935. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范(GB 50007—2011)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation (GB 50007—2011)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese))
- [4] 于贵, 李星, 舒中文, 等. 高层建筑地下室上浮变形特征及处置措施研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 211-218. (Yu Gui, Li Xing, Shu Zhongwen, et al. Research on floating deformation characteristics and treatment measures of high-rise building basement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 211-218. (in Chinese))
- [5] 袁正如. 地下工程抗浮设计中的几个问题[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 519-521. (Yuan Zhengru. Problems in design of anti-uplift in underground engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 519-521. (in Chinese))
- [6] 袁正如. 地下工程抗浮设计中的几个问题[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 519-521. (Yuan Zhengru. Problems in design of anti-uplift in underground engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 519-521. (in Chinese))

- [7] 高文生. 城市地下空间结构设计施工关键问题探析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增1): 1438-1443. (Gao Wensheng. Discussion on the key problems about structure design and construction in urban underground space [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6 (Supp. S1): 1438-1443. (in Chinese))
- [8] 朱东风. 地下结构截排减压抗浮法渗控关键问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. (Zhu Dongfeng. A study on seepage control issues of anti-uplift method for underground structures based on intercepting and discharging water [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [9] 张道真, 彭轩. 地下室抗浮锚索防水构造探讨[J]. 中国建筑防水, 2017, 12(6): 3-4. (Zhang Daozhen, Peng Xuan. Discussion on waterproofing structure of anti-floating anchor rope in basement [J]. China Building Waterproofing, 2017, 12(6): 3-4. (in Chinese))
- [10] 李广信. 关于《建筑边坡工程技术规范 GB 50330-2013》的讨论[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2322-2326. (Li Guangxin. Discussions on "Technical code for building slope engineering (GB 50330-2013)" [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2322-2326. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规范(JGJ 120—2012)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations (JGJ 120—2012)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范(GB 50086—2015)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support (GB 50086—2015)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015. (in Chinese))
- [13] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑工程抗浮设计规程(DBJ/T—125—2017)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017. (Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangdong Province. Specification for anti-buoyancy design of building (DBJ/T—125—2017)[S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese))
- [14] 俞建强. 深大基础工程中的新技术—静力释放层的应用[J]. 建筑施工, 1999, 21(2): 19-21. (Yu Jianqiang. Application of static release layer, a new technology in deep and large foundation engineering [J]. Building and Construction, 1999, 21(2): 19-21. (in Chinese))
- [15] 曹洪, 朱东风, 范泽, 等. 止水帷幕缝隙渗漏变化过程试验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(6): 699-709. (Cao Hong, Zhu Dongfeng, Fan Ze, et al. Laboratory study of leakage process for cut-off wall with crack [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 699-709. (in Chinese))
- [16] 中交路桥技术有限公司. 公路排水设计规范(JTG/TD33—2012)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (CCCC Road and Bridge Technology Co., Ltd. Specification for drainage design of highway (JTG/TD33—2012)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese))

# (上接 486 页)

- [26] 陶明安, 沈扬, 王鑫, 等. 空心圆柱仪模拟列车荷载下土中应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3166-3172. (Tao Mingan, Shen Yang, Wang Xin, et al. Ability analysis of HCA to imitate stress path of soil caused by train load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3166-3172. (in Chinese))
- [27] 陈云敏, 边学成. 高速交通引起的振动和沉降[A]// 全国土动力学学术会议[C]. 2006: 3-13. (Chen Yunmin, Bian Xuecheng. Vibration and settlement caused by high-speed traffic[A]// National Conference on Soil Dynamics [C]. 2006: 3-13. (in Chinese))
- [28] 陈伟, 孔令伟, 朱建群. 一种土的阻尼比近似计算方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(增1): 789-791. (Chen Wei, Kong Lingwei, Zhu Jianqun. A simple method to approximately determine the damping ratio of soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp. 1): 789-791. (in Chinese))