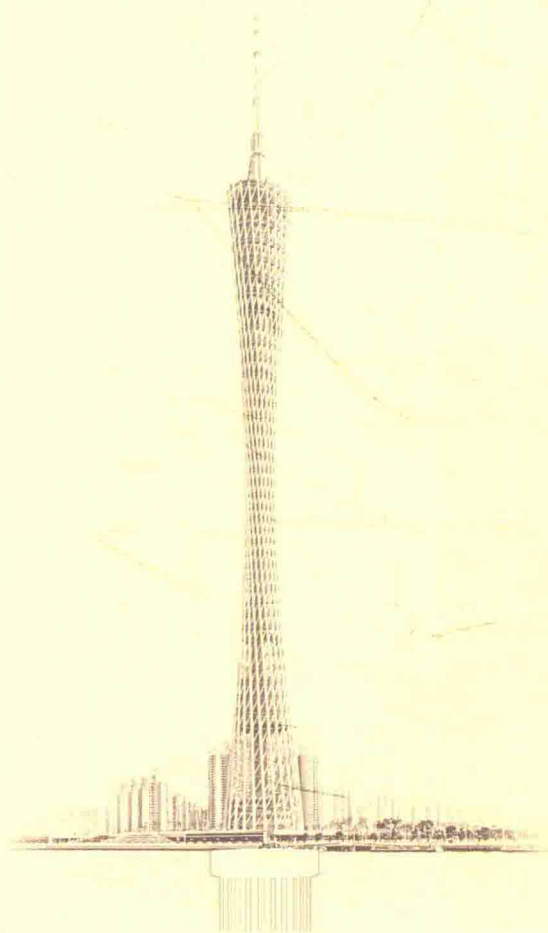


地下结构抗浮

Anti-buoyancy of Underground Structures

唐孟雄 胡贺松 张程林 著



中国建筑工业出版社

地下结构抗浮

唐孟雄 胡贺松 张程林 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地下结构抗浮/唐孟雄等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 4
ISBN 978-7-112-19191-8

I. ①地… II. ①唐… III. ①地下工程-结构工程-研究
IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 040031 号

本书将理论研究、数值模拟、工程设计、检测与监测有机结合, 重点论述地下水设防水位、地下结构抗浮设计及抗浮结构试验。全书分为 13 章和 1 个附录, 主要内容包括: 抗浮设防水位、抗浮设计、地下结构抗浮措施、等截面抗拔桩承载力及变形计算、扩底抗拔桩承载力及变形计算、挤扩支盘桩抗拔承载力、嵌岩抗拔桩的承载力、抗拔桩极限侧摩阻力试验、抗浮锚杆极限承载力、广州塔抗拔桩基础设计、珠江新城中枢线地下空间抗拔基础设计、广州轨道交通六号线如意坊站抗拔基础设计、广州轨道交通六号线文化公园站抗拔基础设计、广州市地下含水层分类及地下水位。

本书可供工程地质、水文地质、岩土工程、结构工程方面的研究人员和工程技术人员参考, 也可作为高等院校师生的参考用书。

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任设计: 董建平

责任校对: 陈晶晶 张 颖

地下结构抗浮

唐孟雄 胡贺松 张程林 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 $\frac{1}{4}$ 字数: 452 千字

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-19191-8
(28462)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

公元前 245 年,阿基米德(Archimeds)在洗澡时突发灵感让他发现了浮力定律,即阿基米德原理。他的名著《论浮体》记载了这个原理,浸在液体中的物体所受的浮力,大小等于它排开的液体所受的重力。

单纯在水体中物体的浮力,看似简单的一个问题,初中课本就学过。可是,如果是地层的土体和岩体介质孔隙中含有地下水,浮力问题就非常复杂了。因此,在阿基米德发现了浮力定律 2260 年之后的今天,人们对城市建设中地下结构抗浮问题还存在模糊的认识,勘察工程师和结构工程师们为确定一个建筑物的抗浮设防水位而争论不休。大到现行国家标准《岩土工程勘察规范》和《建筑地基基础设计规范》,小到全国各省市的地方标准,对建筑物的抗浮设计和稳定性验算的方法和安全系数的取值也不统一。

1999 年,广州市建筑科学研究院作为主编单位牵头启动广东省标准《建筑地基基础设计规范》的修订工作。经编委们多次反复认真研究和讨论,决定增加规范第 5 章地下水作用,可供编制规范参考的资料实在太少,为安全起见,规范规定,“地下水的设防水位应取建筑物设计使用年限内(包括施工期)可能产生的最高水位”,“对地下室抗浮稳定性验算安全系数取 1.05”,对地下结构工程抗浮设计的 2 个关键参数(地下水的设防水位和对地下室抗浮稳定性验算安全系数)的取值完全靠拍脑袋定下来。

2003 年规范经广东省建设厅审批,以粤建科字[2003]116 号文发布实施。随后,广州市建筑科学研究院以唐孟雄为课题组长启动《地下结构抗浮关键技术研究及应用》科研立项申请,2004 年项目获得广东省科技计划项目(项目编号:2004B36001028)立项资助,课题组经过 10 年努力,在地下水的设防水位确定、地下水浮力计算、地下结构抗浮设计与验算、抗拔桩和抗拔锚杆的极限承载力和变形计算、新施工工艺、抗拔承载力基本试验和破坏性试验方法的研究等方面进行了不懈的探索,研究成果在广州电视塔工程(高 610m)、广州市珠江新城核心区市政交通项目(50 万 m^2)、广州市轨道交通 6 号线、广佛线、广州市 2010 年亚运会主场馆珠江新城海心沙地下空间等重大工程项目中得到应用,为解决重大工程抗浮安全问题做出了贡献。

50 年前,全国没有多少高层建筑,建设规模也不大,工业发展水平较低,城市用水量相对较少,南方雨水丰富地区,山坡地到处泉水自溢。北方少雨地区,地下水开采总量有限,地下水位保持在较高水平。

改革开放三十多年来,随着国民经济的快速发展,城市建设日新月异,高层及超高层建筑不断涌现,基础埋置越来越深。同时,在特大城市中,首先是一线城市北京、上海、广州、深圳等地的高层和超高层建筑如雨后春笋般涌现,建筑物高度不断攀升,从 100m 上升到超过 600m。据统计,大城市中心区地下空间建设强度平均值约为 64 万 m^2/km^2 ,地下与地上建设量比平均为 34%。紧随其后是全国二、三线城市各种开发新区的高强度开发。作为车库等功能的广场式建筑的纯地下室部分、裙房或相对独立的地下结构物(如下

沉式广场、地下车库、城市地下轨道交通等)的开发和利用越来越广泛。进入 21 世纪,地下空间开发如火如荼,城市轨道交通的大规模建设将大城市的地下空间挖成蜘蛛网,并与邻近的地下商业街、写字楼和高层住宅地下室连成一片,开挖深度从几米到 50 米左右。大规模地下空间建设对城市局部地下水资源和环境造成了越来越严重的影响,进而诱发环境问题,一方面,城市人口、面积和工业化的大规模扩张,地面河流水资源严重不足,大量开采地下水,导致近半个世纪地下水得不到及时补给,地下水位大幅持续下降,一些城市地下水位埋深在距地面 30m、40m 以下,给人造成一种假象,北方干旱少雨城市对地下工程不需要进行抗浮设计。另一方面,随着南水北调工程的实施,北京等大城市地下水位在 1988~1992 年和 1995~1997 年又再次明显上升,随着国家海绵城市建设战略的实施,将来城市地下水位一定会上升,给建设工程本身带来重大安全隐患。

由于土体的空隙及岩体的裂隙赋存有大量的地下水,地下水对埋置于岩土体之中或之上的地下结构或桩式结构会产生浮托力,若结构的自重小于浮托力时将发生上拱或上浮失稳破坏,影响结构的正常使用。近二十年来,地下室上浮事故时有发生,造成巨大的经济损失。因此,地下结构物的防水和抗浮问题日益突出,系统开展地下结构抗浮关键技术研究对解决地下结构抗浮设计与施工中普遍存在的重大争议问题具有现实意义。

地下水环境的变化及对规划建设的影响,关键在于对地下水位变化的准确预测。地下水位看起来简单,而实际又是如此复杂。长期以来,行业内有张在明院士、张旷成勘察设计大师等的带领,及一批高校、科研院所、工程界的学者和专家们都投身到地下结构工程的抗浮研究中,从不同方向和角度进行理论和实践探索,取得了丰富的成果,为学科的发展和行业的技术进步奠定了坚实基础,但目前为止还是没有形成统一的设计和评价方法,争议很大。因此,开展城市地下水位动态规律及其与城市建设关系的研究是一项前瞻性和现实迫切需要的工作。如果能够在将来的城市规划建设中,较准确地预测地下水位的变化,则由地下水变化带来的环境问题,如地下水赋存、渗流形态及对环境影响的问题、建筑物的抗浮问题、城市的水浸街及垃圾填埋场的淹没造成的污染问题等都可迎刃而解。

古人云:水能载舟,亦能覆舟。有时,水浮力对结构起有利作用,其他时间水浮力对结构又起不利作用,甚至产生损害和破坏。工程设计和建设中,应充分利用水浮力的有利作用,降低抗浮措施的造价。消除和抑制地下水浮力的不利作用,使结构上浮、建筑物裂缝和损害的概率降为零。其中,降排水是控制地下水浮力的有效措施,在临时基坑工程中,在做好止水帷幕的前提下,降排水方案是优选的抗浮措施。当然,山坡地修建建筑物,应充分利用地形地貌,分台阶式建造地下室,在地下室底板下设置疏水措施,达到降低地下水位的目的,利用地下水自排可以不增加长期降排水的运营费用。但作为建筑物永久抗浮措施,在特别重视绿色城市建设和环境保护的今天,长期降排水不仅会增加建筑物运营管理费用,而且,造成局部范围内地下水位大幅下降,带来环境破坏问题,得不偿失。因此,多数情况下需要采取抗拔桩和抗浮锚杆等结构措施。

随着工程机械行业研发投入的加大,新的桩基础、锚杆施工设备和施工工法不断创新,层出不穷。今后,工程界应加大研发力度和投资,开发新装备和新工法,促进地下工程抗浮技术的进步。同时,结构抗浮理论研究,应领先至少不落后于施工设备和施工工法的创新,为国家经济建设和行业的发展做出实实在在的贡献。

课题组在广泛调研国内外地下结构抗浮技术的基础上,试图对已有的理论研究成果进

行梳理,找出共同规律与相互矛盾之处,试图通过创新理论研究和试验路径找到解决问题的合理可行的办法。完成了大量的抗浮结构现场破坏试验和抗拔桩及抗拔锚杆的验收试验,并对大量的抗浮工程实例进行统计分析,归纳总结各种岩土层特性下的地下结构抗浮设计水位的取值,系统研究等截面抗拔桩、扩底抗拔桩、挤扩支盘抗拔桩、嵌岩抗拔桩、抗浮锚杆等抗拔承载机理、承载特性及侧摩阻力规律,丰富了地下结构抗浮设计中的应用理论基础,并通过重大工程的应用验证了设计理论的科学性。

本书主要介绍地下水位的确定、地下结构抗浮设计与试验方法及在工程中的应用。全书共分为 13 章和 1 个附录,分别介绍抗浮设防水位、抗浮设计、地下结构抗浮措施、等截面抗拔桩承载力及变形计算、扩底抗拔桩承载力及变形计算、挤扩支盘桩抗拔承载力、嵌岩抗拔桩的承载力、抗拔桩极限侧摩阻力试验、抗浮锚杆极限承载力、广州塔抗拔桩基础设计、珠江新城中心轴线地下空间抗拔基础设计、广州轨道交通六号线如意坊站抗拔基础设计、广州轨道交通六号线文化公园站抗拔基础设计,附录专门介绍广州市地下含水层分类及地下水位。

借此机会,我们特别感谢对本书的研究提供大力支持的广东省科技厅、广东省住房和城乡建设厅及广州市一些重大建设工程的建设单位广州市地下铁道总公司、广州新中轴建设有限公司等。本专著的出版得到了 2016 年广东科学技术学术专著项目资金支持。此外,在本课题的研究中还参考了其他学者的研究成果,凡引用处分别给予了标注,特表感谢。

本书由唐孟雄、胡贺松、张程林等人著,其他参加撰写和相关科研工作的还有陈乔松、唐孟华、朱志刚、林志元、高琳、邓汉荣、李森、周治国、林泽耿、林景华、刘炳凯等。

本书作者水平有限,旨在抛砖引玉,寄希望更多的科研和工程技术人员一起来关注百年大计的城市地下结构抗浮的技术进步和工程安全问题,不当之处还请指正。

《地下结构抗浮》作者

2015 年 11 月

目 录

第 1 章 抗浮设防水位	1
1.1 引言	1
1.2 抗浮设防水位	4
1.3 地下水浮力的计算	25
1.4 本章小结	32
第 2 章 抗浮设计	33
2.1 荷载分类	33
2.2 地下结构抗浮计算	34
2.3 地下结构抗浮稳定性验算	40
2.4 抗浮三阶段设计理念	42
2.5 本章小结	42
第 3 章 地下结构抗浮措施	44
3.1 概述	44
3.2 压载抗浮技术	45
3.3 降排截水技术	47
3.4 抗拔桩技术	52
3.5 抗浮锚杆技术	53
3.6 新型抗浮桩技术的应用	56
3.7 地铁车站抗浮措施	60
3.8 本章小结	63
第 4 章 等截面抗拔桩承载力及变形计算	64
4.1 概述	64
4.2 等截面抗拔桩极限承载力的计算方法	65
4.3 抗拔桩单桩的变形计算	71
4.4 抗拔桩单桩承载力特性	74
4.5 抗拔桩群桩的极限承载力	77
4.6 抗拔桩荷载-位移曲线及极限承载力预测	80
4.7 本章小结	89

第 5 章 扩底抗拔桩承载力及变形计算	91
5.1 概述	91
5.2 扩底抗拔桩的破坏形态	91
5.3 扩底抗拔桩承载力的计算	93
5.4 扩底抗拔桩荷载-位移曲线	97
5.5 本章小结	100
第 6 章 挤扩支盘桩抗拔承载力	101
6.1 概述	101
6.2 DX 抗拔桩有限元模型	105
6.3 DX 桩抗拔性能	108
6.4 本章小结	113
第 7 章 嵌岩抗拔桩的承载力	114
7.1 概述	114
7.2 嵌岩桩抗拔极限承载力	114
7.3 抗拔桩嵌岩段的极限侧摩阻力	116
7.4 灰色关联分析	117
7.5 嵌岩抗拔桩三维非线性有限元分析	119
7.6 本章小结	122
第 8 章 抗拔桩极限侧摩阻力试验	123
8.1 抗拔桩验收试验统计	123
8.2 广州地铁 6 号线嵌岩抗拔桩试验	133
8.3 太古汇嵌岩抗拔桩试验	139
8.4 嵌岩扩底抗拔桩试验	146
8.5 本章小结	152
第 9 章 抗浮锚杆极限承载力	153
9.1 概述	153
9.2 锚杆(索)扩孔钻头	155
9.3 抗浮锚杆的承载力计算方法	156
9.4 抗浮锚杆的破坏性试验及承载力预测模型	157
9.5 抗浮锚杆的现场验收试验成果分析	162
9.6 砂浆或混凝土与岩石粘结强度统计分析	175
9.7 本章小结	180
第 10 章 广州塔抗拔桩基础设计	182
10.1 工程概况	182

10.2	作用在基础上各种荷载组合及控制内力	182
10.3	基础选型	184
10.4	桩摩阻力试验及设计参数选择	184
10.5	抗拔桩基础设计计算	189
10.6	本章小结	193
第 11 章	珠江新城中轴线地下空间抗拔基础设计	194
11.1	工程概况	194
11.2	作用在基础（底板）上各种荷载组合	203
11.3	基础选型及设计参数	204
11.4	抗拔桩与锚杆设计及计算	205
11.5	抗拔桩与锚杆基本试验及验收试验	207
11.6	本章小结	216
第 12 章	广州轨道交通六号线如意坊站抗拔基础设计	218
12.1	工程概况	218
12.2	作用在基础（底板）上的荷载组合原则	221
12.3	抗拔桩基础选型及设计参数	221
12.4	抗拔桩基础设计与计算	222
12.5	本章小结	226
第 13 章	广州轨道交通六号线文化公园站抗拔基础设计	227
13.1	工程概况	227
13.2	作用在基础（底板）上荷载组合原则	228
13.3	基础选型及设计参数	228
13.4	抗拔桩设计	232
13.5	本章小结	235
附录 A	广州市地下含水层分类及地下水位	237
A.1	自然地理条件	237
A.2	地下水的类型及其富水性划分	241
A.3	广州地区河流阶地的分布及特征	251
A.4	地下水补给、径流、排泄条件	253
A.5	广州市地下水资源开采状况对地下水位影响	254
A.6	广州地区地下水化学特性及环境调查	257
参考文献		275

第 1 章 抗浮设防水位

1.1 引 言

近 30 年来,随着国民经济的快速发展,城市建设日新月异,大中型城市建设用地日益紧张,高层及超高层建筑如雨后春笋般不断涌现,同时,城市地下空间开发的规模和强度越来越大,基础埋置越来越深,作为车库等功能的广场式建筑的纯地下室部分、裙房或相对独立的地下结构物(如下沉式广场、地下车库、地下轨道交通等)的开发和利用越来越广泛。由于土体的空隙及岩体的裂隙赋存大量的地下水,地下水对埋置于岩土体之中或之上的地下结构或桩式结构会产生浮力,若结构的自重小于浮力时将发生上拱或上浮失稳破坏,影响结构的正常使用。因此,地下结构物的防水和抗浮问题日益突出。由于地下水浮力造成的地下室破坏大致有两类:一类是地下室底板隆起,导致底板破坏,这种破坏多发生在高层建筑地下室中;一类是地下建筑整体浮起,导致梁柱结点处开裂,同时底板也破坏,这种破坏多发生在高层建筑地下室施工期间或地下构筑物使用期间。

地下水是指赋存于饱和土层和岩土孔隙、裂隙及空洞中的水之总称。地下水作为岩土介质的组成部分,直接影响着岩土工程性质和行为。随着我国城市化进程的加速,城市地下空间开发强度的加大,城市建设与地下水的关系越来越密切。据不完全统计,在我国沿海地区和内地曾出现过百余起因地下水作用而导致建筑物地下室和地下构筑物破坏的事故。如广州市在 20 世纪末,在天河路某 40 多层带裙房的超高层建筑,有四层地下室,采用钻孔灌注桩基础,地下室施工完成后,地面建筑也已经施工多层,地下室侧壁尚未回填压实,一场暴雨,引起建筑物整体上浮四十多厘米。广州市在 21 世纪初,在法政路某 30 多层的高层建筑,有三层地下室,采用天然地基上筏板基础,底板与基岩直接接触,底板下布置了抗浮钢筋锚杆,地下室施工完成后,地面建筑已经施工多层,地下室侧壁尚未回填压实,又是一场连续暴雨,引起地下室不均匀上浮十几至二十厘米,抗浮锚杆失效。

海口市梦幻园商住小区裙楼^[1]于 1996 年 9 月 19 日至 20 日,因受大暴雨袭击海水上涨,地下水位迅速提高,致使还在兴建中的四层楼的二层地下室箱体浮出地面高达 4.5m。其原因就是区内除分布着 2.3~6.5m 厚的中砂强透水含水层(渗透系数为 24.20m/d)外,还有深层承压水,其水头高度高出含水层顶板 4.5~5.0m,这层承压水的上浮力据计算为 90kPa,对基础影响较大,又因地下室基础大部分建在强透水的中粗砂含水层中,地下水对基础的总上浮力可达 $2.9 \times 10^3 \text{ kN}$,因浮力超过了地下室的箱体自重,所以造成地下室的整体上浮。

广东江门市某商住楼^[2],总建筑面积 32860m²,主体结构已完成。地下室为 2 层框架剪力墙结构,建筑面积 11610m²,埋深为 7.15m,采用梁板式筏基,底板厚 350mm。本场地岩土层分布自上而下依次为:杂填土,厚 1.7~3.2m,淤泥质黏土层,厚 2.4~10.7m,

粉质黏土层,厚1.0~5.5m,砾砂层,厚0.8~3.5m,全风化砂砾岩层,厚1.1~5.9m。场地内地下水主要为地表滞水、孔隙水、结合水和裂隙水。地表滞水分布在杂填土层,孔隙水分布在砾砂层,透水性强,结合水分布在淤泥质黏土层和粉质黏土层,裂隙水分布在全风化砂砾岩层。勘察报告测得钻孔水位为1.0~1.4m,建议抗浮设防水位为1.0m,而设计取值为现地面以下2.0m,水浮力作用面取至底板面标高(-6.8m),而非底板底标高(-7.15m),建筑物整体抗浮满足,而局部抗浮不满足。主要表现在塔楼及附近部分区域底板板中范围出现起拱或开裂,而伸出主体塔楼范围的地下室上部由于作为露天停车场使用,因重量轻出现底板连同部分柱基起拱和底板板中范围开裂的情况。

深圳市阳光花园^[3]位于深圳市南山区后海湾半岛,该地区原为填海滩涂,常年地下水位较高,最高可达到标高2.6m,该花园地下室是小区配套的全埋式人防地下室,长48.9m,宽21.5m,一层地下室,顶板覆土0.95m,地面为小区绿化广场,地下室采用天然地基,双向肋形筏板基础。1999年4月18日开挖基坑,同时进行井点降水,8月13日地下室主体结构施工完成,8月21日基坑回填土方,23日停止降水,27日地下室南侧上浮60mm,9月1日深圳地区普降大雨,9月3日地下室出现明显上浮和整体倾斜,地下室南侧上浮680mm,北侧上浮130mm。

深圳宝安中旅大酒店^[4]位于深圳市宝城前进路与创业路交汇处,主楼高20层,裙楼高3层,地下室1层,深为-5.6m。上部为框架结构,基础为大直径钻孔灌注桩,地下室底板厚500mm,桩端为中—微风化花岗岩。其中场地A~C轴与①~⑨轴分布有砂砾层透镜体,渗透性好、涌水量较丰富,其余地段为粉质黏土。勘察报告提供的地下水位埋深为3.7~4.8m,为孔隙潜水。当地下室完成闭坑上部结构施工时,裙楼部位各柱出现不同程度上浮,上浮最大量达160mm,地下室顶、底板也不同程度开裂、渗水,主楼部位则稳定。

深圳西乡镇朱坳水厂三期地下水池^[1]在顶板未覆土之前做充水试验,放水后发现沉降缝两侧发生不均匀上浮,一天内局部最大上浮量达500mm。大连、上海、广州及台湾等沿海地区也曾发生过类似事件,而台湾就有典型的七例高层建筑地下室上浮事故,即花

莲、员林、新庄、彰化、高雄、大直重划区及高雄上浮案例^[5]。台湾七例地下室上浮事故中上浮现象的共性是:因地下室结构体的重量不均匀分布,且地下室外墙与土之接触状况在各边也不相同,由此地下室较少呈现均匀上浮现象。实际案例显示上浮的地下室皆有某一角上浮量较大,称为“翘角”现象。可能因为重量较轻,或该位置外墙与土体的摩擦力较低,故产生较大的上浮量。不均匀上浮的地下室“卡”在土层中,较难使其下沉至原标高处。地下室上浮时,基础底板与100mm厚素混凝土垫层脱离,导致其间隙充满地下水及随地下水涌入的砂土(图1-1)。堆积在间隙中的砂土顶住底板,导致后续处理时地下室难以沉回原始高程。此外地下室上浮时因结

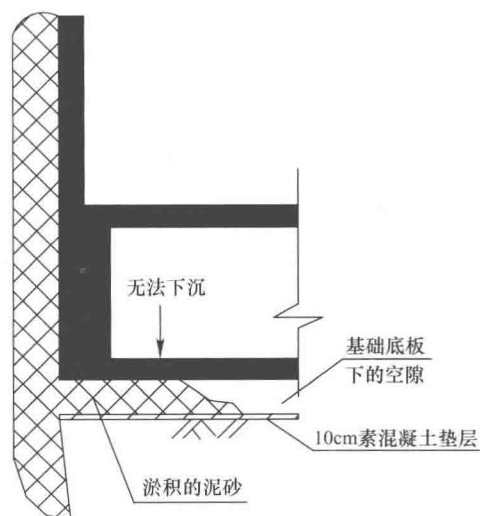


图1-1 底板遭淤泥顶住无法下沉

构体陡然承受预期外的荷载,结构体略有损坏,如梁、柱及结构墙有裂缝产生。简而言之,台湾七例地下室上浮现象的原因是结构体重量及地下室侧壁摩擦力之和小于水浮力所引起。

长沙某医院两层独立地下车库^[6],在施工过程中,出现整体上浮,最大上浮高度达到1.42m;又如,某体育中心游泳馆,地下室上浮造成上部结构梁、板、柱产生大量裂缝;再如,某高层建筑地下室底板局部隆起高达350mm,柱间出现45°破坏性裂缝等。

近年来,工程建设由于对地下水认识不足,考虑不周到,引发地下室整体或局部上浮、上部结构开裂甚至破坏的事故屡见不鲜,诸如此类建筑物抗浮失败的案例时有发生,造成了大量财产的损失。究其原因,产生问题的关键因素在于不合理的抗浮设防水位的确定,主要表现为以下几种情况:

(1) 勘察报告未明确抗浮水位,只描述钻孔的可见水位,设计人员误将勘察报告提供的建设场地实测水位当成是抗浮设防水位,导致抗浮设防水位取值偏低;

(2) 抗浮设防水位的影响因素分析不全面,将近期3~5年的最高水位取值为抗浮设防水位;

(3) 临近江河且具有透水层的建筑场地,按一般场地提出抗浮水位,未考虑设计使用年限的江河最高洪水位的影响;

(4) 根据业主节约投资的需要,或业主要求增加地下室的层数后,原勘察报告并未提供抗浮设防水位,也不进行补充勘察,随意修改或确定抗浮水位;

(5) 设计人员忽视主体结构外的地下室局部自重小于浮力的受力单元的抗浮验算;

(6) 地下室尚未回填完成,施工单位就停止抽排地下水;

(7) 地下室侧壁回填砂及石粉等强透水性土体不符合要求,或回填土体密实度不满足设计要求;

(8) 连续暴雨或海水倒灌造成地下水位急剧升高,超过抗浮设防水位,或洪水直接将地下室淹没。

大量案例显示,地下室上浮的意外事故可能发生在各种地层中,包括透水性极低的软黏土层或极稳定的卵石层中。长期地下水位低也不保证不会发生上浮,如石家庄20世纪60年代前的地下水位,大致在地面以下3~5m,而随着城市建设的发展,地下水过度开采,致使地下水位逐年下降,形成以市中心为降水漏斗的态势,依据文献^[7],至20世纪80年代,地下水位已降至地面以下15m左右,到21世纪初已降至地面以下30m左右,目前城市中心区已降至40m以下。如果照此规律发展,石家庄无须进行抗浮设计。然而有资料显示,石家庄30年后地下水位可能升至20世纪80年代水平,即地面以下15m左右,50年后可能升至地面以下10m左右。如果按现在地下水位可不进行抗浮设计,未来必将因地下水位回升而发生上浮事故。另外,地下水位可能因暴风雨、地表溢流或施工不慎等因素突然升高,地下水浮力一旦超过结构物重量及侧壁摩擦力之和时则上浮事故随之发生,建筑物将产生变形等破坏,不能保证正常使用的安全。由此,地下结构物的抗浮问题成为影响结构工程设计安全系数和工程投资效益的难题之一,引起了工程界的高度重视和广泛关注。

随着城市建设的高速发展,地下结构抗浮设计问题日渐突出。主要表现在以下几方面^[8]:

(1) 抗浮设防水位如何确定。很多高层建筑的基础埋置深度超过 10 余米,北京、上海、广州、深圳等大城市已经有许多建筑的基础埋深超过 30m,加上建筑体型往往比较复杂,大部分广场式建筑的建筑平面内都包含有大面积的纯地下室或地下车库。若干城市还修建了地下广场、下沉式花园,在抗浮设计和地下室外墙承载力验算当中,正确确定抗浮设防水位成为一个牵涉巨额造价以及施工难度与周期的关键和热点问题。

(2) 建筑场地孔隙水压力如何确定。高层建筑的基础多采用箱基或筏基类型,基础宽度很大,加上基底压力较大,基础的影响深度可数倍、甚至十数倍于一般多层建筑。在这个深度范围内,就北京地区而言,有时可能遇到 3 层以上的地下水。不同层位的地下水,水力联系和渗流形态往往各不相同,造成人们难于正确掌握建筑场地孔隙水压力的分布。

(3) 最高水位如何进行长期预测预报。地下水位的变化,原是一个随机过程,在人类的城市化过程中,城市的地下水位又受人文活动的严重干扰,按建筑物使用年限为 50 年或 100 年考虑,这么长的周期内,最高地下水位的预测预报非常困难,直接影响到建筑物设防水位的准确确定。

(4) 地下建筑物抗浮稳定性如何验算。如果对抗浮设防水位的确定和地下水压力计算考虑不周,地下建筑物抗浮稳定性验算就首当其冲,要么不满足安全要求,要么浪费惊人。

1.2 抗浮设防水位

随着高层建筑和地下工程的大量兴建,地下结构抗浮的问题越来越突出,行业内对抗浮水位的概念提法很多,到底是抗浮设防水位?还是抗浮设计水位?或简称为抗浮水位?争议很大。《高层建筑岩土工程勘察规范》JGJ 72—2004^[9]给出了抗浮设防水位(water level for prevention of up-floating)的定义,“地下室抗浮评价计算所需的、保证抗浮设防安全 and 经济合理的场地地下水位”。《北京地区建筑结构抗浮技术导则》^[10]给出了抗浮水位(groundwater level for structural anti-buoyancy design)的定义,“考虑到地下水位动态规律,在一定现场监测和室内分析计算的基础上,提出一个用于结构抗浮设计参考的安全而经济的地下水水位”。两个定义表述不同,但都包含在建筑物施工和使用期间,保证安全 and 经济合理的要求。一方面,不致因地下水上升、浮力加大而引起抗浮失效;另一方面,采用的抗浮设防水位应合理,以控制地下建筑物的建造成本。设防水位是场地水位,应以较大范围的区域水文地质条件为基础,而不是以单个建筑来考虑,而且要通过现场监测和分析计算综合确定设防水位。本书统一称之为抗浮设防水位。简言之,抗浮设防水位可以取建筑物在其施工和使用年限内可能遇到的最高水位。

1.2.1 地下水位多年动态规律及影响因素

地下水位的升降是地下水均衡的外在表现,某个水文年内地下水补给量大于地下水排泄量,地下水位就上升,反之则下降。地下水位变化的影响因素包括地形地貌、水文条件(地表水体)、地层岩性(包气带岩性及厚度)、降水及蒸发、含水层储水特性等自然因素和人工开采、灌溉、排水等人为因素。

1. 北京地区地下水位

北京市位于华北平原的西北缘,西、北及东北面三面环山,东、南及东南面为广阔的平原区。西部地层以碎石类土为主,向东则逐渐形成黏性土、粉土、砂土与碎石类土的交互沉积,第四系覆盖层的厚度也由数米增加到数百米。地下水的赋存从西部的单一潜水层,向东、东北和东南逐渐演变成多层地下水的复杂含水系统。

北京地区地下水位的影响因素主要有以下方面^{[8][11][12]}:

(1) 大气降水对地下水位动态变化的影响

从1954年至今,大气降水对北京市区地下水的年平均补给量(包括山前侧向补给)约为 $5.5 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,多年来,上下变化幅度不大。根据43位两院院士和近300位专家参加完成的《中国可持续发展水资源战略研究》报告,未来的大气降雨量将会保持一个稳定的水平,甚至会有一个缓慢下降的趋势。说明大气降水量的变化不是引起地下水水位多年连续升降变化的主要因素。

(2) 地下水开采量变化的影响

据多年观测资料,地下水开采量与地下水位的关系非常密切:北京市区潜水水位多年动态变化主要受人为因素的影响,即随着地下水开采量的增加,地下水位普遍下降,随着地下水开采量的减少,地下水位回升。1960年以前,北京市区地下水人工开采量很小,地下水位动态受自然因素影响,地下水位较高;1960年~1970年,随着地下水人工开采量增加,地下水位缓慢下降;1971年~1979年,随着地下水开采量的急剧增加,地下水位下降速度加快,降落漏斗范围不断扩大;1980年~1985年,遇连年干旱,地下水超采更为严重,各观测孔地下水位出现历年水位的最低值;1985年以后,由于北京市开展了水资源管理,并采取了多种措施,地下水开采量得到一定的控制,地下水位变化趋势平稳,出现上升趋势。1988年后,地下水开采量相对减少,地下水位升幅较快。1992年以来,地下水又处于超采状态,地下水位又出现了不同程度的下降。

根据北京市水利局资料分析,北京市平原区平均地下水位的变化量 ΔY (单位:m)与地下水资源变化量 ΔX (单位:亿 m^3)呈线性相关,回归方程为: $\Delta Y=0.1953\Delta X$ 。

即每补给或超采1亿 m^3 水,地下水位将上升或下降0.1953m。

(3) 官厅水库放水的影响

官厅水库是永定河上最大的水库,如1995年10月17日至1997年11月16日共放水5次,放水总量累计为11.64亿 m^3 ,根据地下水动态观测资料,这次放水造成了北京市区(尤其京西地区)地下水位显著上升了5~10m,且距永定河愈近,地下水位升幅愈大。

官厅水库放水对北京地区的地下水影响较大,尤其是西郊一带,由西向东逐渐减小。地下水位观测数据表明,青塔地区在放水后,潜水水位由原来的33m上升至46m,此处非饱和卵石层中水力坡度为3.5‰,在西三环西局附近地下水位上升至36m,在西单附近上升至32m,在西局与西单的水力坡度分别为2.0‰和0.8‰。可见,永定河放水的补给范围主要在中轴路以西部位,对于东部、东南部及北侧影响较小。在确定抗浮设防水位时需要根据场地与永定河的相对位置区别对待。

(4) 南水北调的影响

跨流域调水即南水北调带来的影响主要是长江水进京后将会弥补北京市水资源的连年

亏损,南水北调工程每年将向北京地区补充水量 12 亿 m^3 , 其中约有 3 亿 m^3 用于地下水回灌, 会使地下水下降趋势一定程度地缓解甚至上升, 但是, 上升的幅度会受到限制, 水位上升太高, 会影响地下设施和市政工程的正常使用, 造成人为灾难。

(5) 其他影响

随着市区范围的扩展和市政设施的完善, 地面径流条件将明显改善, 同时路面的硬化也将使入渗条件趋于恶化, 这些因素将造成大气降水对地下水补给量的减少, 最终影响到地下水位的变动。建设工程施工降水也对地下水位有一定的影响。

2. 长沙地区地下水位

以长沙为例^[13], 长沙地处湘中丘陵与洞庭湖平原的过渡地带, 湘浏盆地西南缘。地貌分为剥蚀构造丘陵与河流堆积 V 级阶地两类, 其北、西、南三面环山, 中、东部为湘江、浏阳河冲积阶地, 自南往北阶地由老至新递降^[14]。

地下水类型可分为孔隙水、岩溶水及基岩裂隙水^[13]。

(1) 孔隙水: 分布于河流两岸的全新统橘子洲组 (Q_i), 更新统白水江组 (Q_{hs})、马王堆组 (Q_{mw})、白沙井组 (Q_b)、洞井铺组 (Q_d) 及新开设组 (Q_x) 的砂砾石层中, 为潜水或微承压水。其中, Q_i 、 Q_{hs} 、 Q_{mw} 中, 富水性丰富, 单井流量大于 $1000\text{m}^3/\text{d}$ 。

(2) 岩溶水: 分为覆盖型与埋藏型两类, 分布于 C、 D_s 、 D_q 中, 富水性中等, 单井流量 $100\sim 1000\text{m}^3/\text{d}$ 。

(3) 碎屑岩裂隙水: 赋存于白垩系 (K_s^1 、 K_d^2 、 K_{dn}) 与古近系 (E_2^1 、 E_2^2) 地层中。其中 K_s^1 、 K_d^2 中富水性中等, 井泉流量 $0.1\sim 0.5\text{L/s}$, K_{dn} 、 E_2^1 、 E_2^2 中富水性贫乏, 井泉流量小于 0.1L/s 。

(4) 浅变质岩裂隙水: 赋存于震旦系 (P_i) 地层中, 水量贫乏, 井泉流量小于 0.1L/s 。

一般与工程建设关系密切的浅层地下水以孔隙水为主, 赋存于各阶地砂砾石层中, 其流向受基底和地势的控制。I、II 级阶地的富水性相对于 III、IV 阶地较好, IV、V 阶地中的地下水之间有一定的水力联系。

长沙市地下水动态具有以下特征:

(1) 孔隙水: 具有埋藏浅、变幅小, 季节性变化明显等特征, 主要受大气降水及江河水位的影响。主城区地下水受大气降水影响较弱, 水位动态变幅较小, 为 $1\sim 3\text{m}$, 外围地下水变幅一般为 $5\sim 8\text{m}$ 。根据湖南省地质环境监测总站对主城区 3 口长期观测井的资料显示, 除鸳鸯井水位因城市建设引起地下水径流场改变而呈阶段性、缓慢下降趋势外, 其他两个监测点地下水位相对比较稳定, 并且呈周期性变化, 明显的丰枯季。浅表地下水位动态总体稳定。

(2) 岩溶水: 动态受大气降水影响随季节变化, 雨季上升, 旱季下降, 总体变幅较小, 年变幅 $1\sim 2\text{m}$ 。基岩裂隙水大部分为潜水, 深部覆盖型的基岩由于受补给的限制, 富水性弱。

(3) 浅部的基岩裂隙水: 主要靠大气降水补给, 储存于裂隙中, 存储空间有限, 动态特征具有季节变化, 变化较大。

将来对地下水位影响还有一个值得关注的问题是, 湘江水利枢纽工程建成蓄水后必然

会对本地区的地下水赋存条件、变化幅度及区域内地下水补给排泄关系产生影响,对沿江两岸地下水的抬升产生影响,影响最大者主要在Ⅱ级阶地范围内。目前,建设主管部门已着手考虑全城排水系统的改造,也将对地下水位的变化产生影响。

1.2.2 抗浮设防水位的确定方法

地下水位的变化具有一定的不确定性,如果不受人为干扰,原是一个随机量,地下水位是随机变化的,不但与地下水本身天然变幅、地层赋存条件以及气候变化、降水多寡等自然因素有关,而且在人类的城市化过程中,城市地下水位受到人文活动的严重干扰,如地下水开采、水资源利用、水库蓄洪泄水等,在勘察、设计、施工、正常使用期间均有可能不同。单纯以历史最高水位、历史最低水位或勘察期间水位来确定抗浮设防水位都不正确。最高水位的预测预报非常困难,直接影响到地下结构抗浮设防水位的确定。

抗浮设防水位的取值对建(构)筑物结构安全和投资有重大影响。取值过低会危及工程安全,取值过高往往造成投资上的巨大浪费和工期不必要的延长。因此,科学合理地确定抗浮设防水位具有重要意义。

抗浮设防水位的确定必须以长期的地下水动态观测为基础,根据区域和整个场地的水文地质条件或地下水埋藏条件来确定,即由地下水类型、分布和埋藏深度、含水层数目、岩性结构、含水层构造特点、地下水的补给、排泄条件等来确定^[15]。下面以几个城市为例说明抗浮设防水位的确定方法,从各地抗浮设防水位的确定方法看出有很强的地域性。

1. 广州及珠江三角洲地区抗浮设防水位

广州及珠江三角洲地区基本处于海相冲积平原,地下水位普遍较高,在靠近河涌两岸,受潮汐影响很大。地下结构抗浮设防水位取值高低决定了建筑物是否安全或是否太保守造成巨大的浪费。珠江三角洲地区位于我国南方亚热带滨海地区,不但季节性降雨较大可使地下水位上升到地表形成洪涝灾害,而且由于靠海较近,地下水受潮汐影响波动较大,广州受潮汐影响一般为农历每月初三和十八,外江水位达到最高值,若此时恰遇上游的洪峰到达,两相叠加,即使城区不下雨,也会产生水浸街的现象。因此,抗浮设防水位的确定应考虑最不利的情况,并注意以下几点:

(1) 岩土工程勘察报告提供的水位,是勘察单位在勘察期间所测定的地下水位,时间较短,具有一定的偶然性和季节性,因此缺乏代表性,此水位不能作为抗浮设防水位。

(2) 建设场地的长年观测的最高水位,一般为当地的最高洪水位。特别要注意的是,此水位在珠三角不少地区甚至高出地面不少,这种情况下,如采用设计地坪作为抗浮设防水位,往往容易发生上浮事故。建设单位应向水利部门书面发函征得。水位的重现期重要的城市及工程应按 100 年考虑,一般工程按 50 年考虑,广州地区 100 年一遇的洪水位为珠基高程 2.80m。

(3) 由于珠三角地区地势普遍低洼,建设资金充裕时在场地直接填土使设计地坪高于防洪标高,不少地方的防洪措施是围垦设泵站强排,设计地坪比围垦堤岸要低得多,这种情况下,应尽量提高设计地坪标高及抗浮设防水位。

(4) 近年来广州市河涌整治,重新修复河堤,特别是采用钢筋混凝土挡墙或水泥砂浆

填缝的砌石挡墙作护岸后，河涌水与地下土层的水力联系被截断，河涌水不能对地下含水层进行补给，河涌两岸的地下水位会受到较大影响。

(5) 以往广州地区暴雨台风季节内涝严重，水浸街的事经常发生，近年对全城排水系统改造升级及地下排水深隧系统建成后，对地下水位变化也将产生影响。

(6) 广州地下轨道交通已规划建设 23 条线，将来建设的线路更多，规划总里程 1025km，将广州市区纵横切割成许多条块，对条块内地下水位变化的影响不容忽视。

(7) 有些建设场地位于山丘地带，如花都、清远、惠州等地，原场地的常年最高水位就已经远远高于周围洪水位标高，但此时常年最高水位也不适宜作为抗浮设防水位，应考虑地下室基坑开挖后的回填材料的渗透性。若场地经过基坑开挖后，回填砂、石屑等透水性强的材料，暴雨过后地下水位快速上涨，地下水会在场地内形成较长时间的地下滞水，此时应以设计地坪作为抗浮设防水位。

2. 北京地区抗浮设防水位

北京市勘察设计院通过对北京市水文地质条件和地下水赋存特征的长期研究^[16]，将北京地区浅层地下水分为 3 个大区和 7 个亚区，见表 1-1，并掌握了近 50 年地下水动态观测资料，在此基础上建立了地下水预测和预报系统，研究了地下水典型渗流特征及其对建筑场地孔隙水压力分布的规律，将北京市的抗浮设防水位取值方法归纳如表 1-2 所示^[10]。

北京地区的浅层地下水分区

表 1-1

大区	Ⅰ 区			Ⅱ 区		Ⅲ 区	
亚区	Ⅰ a 区	Ⅰ b 区	Ⅰ c 区	Ⅱ a 区	Ⅱ b 区	Ⅲ a 区	Ⅲ b 区
位置	东北郊	东郊	东南郊	老城区东北部	老城区大部	清河流域	西郊西南郊
地下水赋存特征	30m 内有 2~4 个含水层；上部台地潜水；中部 1~2 个层间潜水含水层；下部潜水（局部承压）	基本同Ⅰ a 区。台地潜水分布不连续。其中，古河道岩性颗粒较粗，成为本地区地下水汇水廊道	基本同Ⅰ a 区	围绕王府井一带上层分布有丰富的上层滞水；下部为滞水—承压水	上层较少上层滞水；下部为潜水—承压水	潜水类型，分布特征受现代河流控制，河流一级阶地下分布有承压水	潜水，一般埋藏较深，受人为因素影响，水位变幅较大

北京市的抗浮设防水位取值方法

表 1-2

基底所在层位	Ⅲ b 亚区	Ⅱ a 和 Ⅱ b 亚区	Ⅰ a、Ⅰ b 和 Ⅰ c 亚区	Ⅲ a 亚区
第一层含水层	潜水-承压水 远 期 最 高 水 位*	上层滞水远期最高水位*	台地潜水远期最高水位*	阶地潜水远期最高水位*
相对弱透水层		利用一维渗流模型进行预测不利条件下水压力分布，然后由伯努利方程换算确定		
层间水含水层		利用一维渗流模型进行预测不利条件下水压力分布，然后由伯努利方程换算确定；对于古金沟河故道地层较为简单的地区，方便起见可直接利用三维渗流模型预测成果		
相对弱透水层		利用一维渗流模型进行预测不利条件下水压力分布，然后由伯努利方程换算确定		
第三含水层		潜水-承压水远期最高水位*		

注：* 号为三维渗流模型预测成果。