

地下建筑物浮力探讨及其设计应用

郭跃龙 张钦喜

(北京工业大学,北京 100124)

【摘要】 简要介绍了地下结构浮力方面的一些新的比较有说服力的研究成果,结合这些研究成果及现场实际的部分粘结预应力抗拔桩荷载试验结果,对抗拔桩进行了优化设计,降低了抗浮投入。

【关键词】 抗浮设防水位;折减系数;新型桩;桩设计

【中图分类号】 TU 46; TU 9

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.04.011

Buoyancy Discussion and Design Application of Underground Building

Guo Yuelong Zhang Qinxi

(Beijing University Of Technology, Beijing 100124 China)

【Abstract】 This article briefly introduces some new quite convincing research results about buoyancy aspect of underground structure, unifies these research results and the actual load test results of part caking pre-stressed anti-pile pulling, the resistance pile pulling has carried on the optimization design, reduced the investment of anti-floats.

【Key words】 water level for prevention of up-floating; Reduction coefficient; New pile; Pile design

0 引言

地下结构抗浮设计涉及两个关键因素的确定,一个就是抗浮设防水位,另一个就是地下结构基底所受浮力是否可以折减。本文在综合各位同行有关这方面观点的基础上提出自己的看法,并对实际工程进行优化设计。

1 抗浮设防水位及地下结构所受浮力探讨

1.1 抗浮设防水位的确定方法

传统的抗浮设防水位是指第一层地下水的最高水位。相关规程^[1]第 8.6.2 条第 1 款规定:当有长期水位观测资料时,场地抗浮设防水位可采用实测最高水位;无长期水位观测资料或资料缺乏时,按勘察期间实测最高稳定水位并结合场地地形地貌、地下水补给、排泄等因素综合确定。文献^[2]对场地抗浮设防水位的解释是各含水层最高水位之最高者,认为层间潜水和下面的承压水水头一般不会超过第一层潜水的水位,所以通常情况下应把第一层潜水水位做为场地抗浮设防水位,只有在承压水的最高水位超过第一层潜水最高水位时才以它的最高水位作为“场地抗浮设防水位”;黄志仑大师则认为^[3]应把基础所在水层的最高水头做为该建筑

的抗浮设防水位。

文献^[2]对抗浮设防水位的定义显然是从较大范围的设防来考虑的,实际操作中虽然比较容易确定抗浮设防水位,但往往会造成抗浮设防水位偏高,给建设带来浪费。文献^[4]则认为各层地下水最高水位=勘察期间该层地下水最高水位+该层地下水在相当于勘察时期的年度变幅+可能的意外补给造成的该层水位上升值。这个观点被文献^[2]所接受。也就是说在具体的地下水最高水头的确定上没有大的分歧,分歧是在到底是应该大范围的保守的确定一个抗浮设防水位还是具体工程具体对待的问题。综合分析以上两种观点,文献^[2]应该是从大范围来说明抗浮设防水位的,但是在实际操作中则应该尊重事实,具体问题具体分析,在安全的前提下尽量节省资源。中兵勘察设计研究院杨翠珠高级工程师对这两种算法进行了比较^[5]。

一个建筑场地抗浮设防水位的合理确定,应当以每个城市的区域水文地质条件、地下水埋藏赋存条件、以及系统的长期地下水动态观测条件为基础。北京市勘察设计研究院经数十年的工作,建立了地下水预测、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规律的影响,为经济合理的确定基底地下水浮力打下了坚实基础^[6,7]。

综上所述,抗浮设防水位我们比较赞同文献^[3]的观点及文献^[4]的算法。

1.2 地下结构所受浮力的折减问题

随着建筑物的基础埋深不断增大而产生大量地下水问题,由它产生的浮力对地下结构的影响尤为突出。当地下水位上升至基础底面以上时,传统的设计方法是用第一层地下水的最高水位与基础底板的高程差,通过静水压力公式计算基础底板的浮力。有关研究表明^[8]这样往往过大的估计了地下水的浮力,从而会使基础抗浮措施的设计过于保守。

黄志仑大师认为^[9],静水压强等于静水头(h)与贯通孔隙率(k)及水重度(γ_w)的乘积, k 值应小于1。李广信教授则认为^[10],地下建筑物的浮力与地下水的赋存形态及其运动有关,有效应力原理同样适用于粘性土,粘土地基浮力一般与其孔隙率无关,基底浮力应通过渗流计算分析确定。

当地下室底板埋置于砂层中时,其所受浮力即为按所在层地下水压力水头求得值(见表1);当地下室位于相对弱透水层的粉质粘土中时,其浮力实测值仅为传统理论值的75%左右;粘质粉土则相对较高,一般超过80%;当场地内分布有多层地下水并涉及多层土时,问题比较复杂,需要通过渗流分析进行具体的计算。

表1 不同工况下的浮力以及测压管的压力水头理论值与实测值的对照表^[8]

对比项目	试 验 工 况					
	GK1-2	GK1-3	GK1-4	GK1-5	GK1-6	
量 力 环 测 试	实测浮力/N	46.87	65.5	61.5	58.15	37.98
	理论浮力/N	47.69	81.9	81.9	81.9	55.85
	实测值与理论值之比	0.98	0.8	0.75	0.71	0.68
测 压 管 测 试	实测压力水头值/cm	52	25.6	23.6	24	6.7
	理论压力水头值/cm	52	32	32	32	10
	实测值与理论值之比	1	0.8	0.74	0.75	0.67

北京市区受地下水持续下降的影响,建筑场地内孔隙水压力分布呈现明显的非线性特征(见图1),实测孔隙水压力曲线明显偏离按最高水位计算求得的理论静水压力曲线。

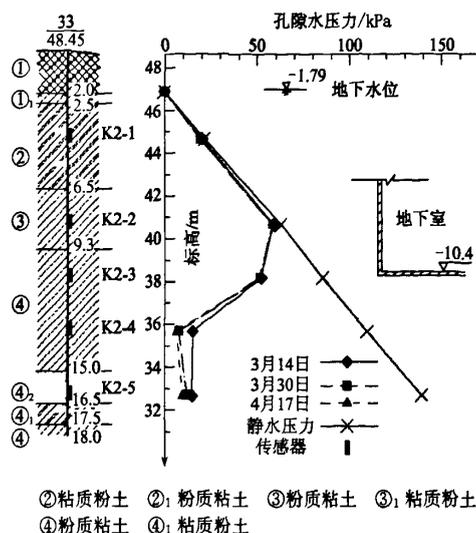


图1 实测孔隙水压力图^[8]

我们通过用渗流分析软件对一些实际工程进行模拟计算,发现基底的孔隙水压力明显小于静水压力值,基底中心部位还有负孔压存在的现象。理论分析及数值模拟对基底浮力的计算虽然具有重要的指导作用,但基底浮力的最后确定还要根据孔隙水压或地下水压力实测曲线进行分析推断。

综合同行们的研究成果及一些大型浮力研究实验可以得出,渗透性较差的粘土及粉质粘土等相对隔水层中,实测孔隙水压力明显小于理论静水压力。这些土中的折减系数可取为0.6~0.8不等,实际工程中若地下室底板位于厚层粘性土层中时可根据具体情况按此系数进行折减。

结合以上有关抗浮设防水位及地下水对地下结构浮力方面的一些研究成果来介绍一种新型桩,即部分粘结预应力抗拔桩在工程中的设计及应用。

2 工程应用实例

2.1 工程概况及水文地质条件

2.1.1 工程概况

某工程一、二、三号楼地下部分连为一体,基础埋深12.0m左右。一~三号楼均为筏板基础,一号楼东西两侧为地下三层车库,地上部分无建筑物。本工程士0=51.9m。

2.1.2 工程地质条件

拟建场地为永定河冲积扇的中部,地形平坦,根据钻孔数据及土工试验数据,拟建场地地层分为人工填土层及一般第四纪沉积层。一号楼东西向概化的地质剖面图见图2。

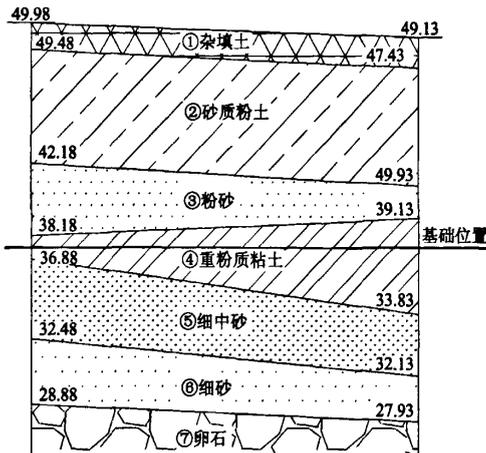


图2 地层剖面图

2.1.3 水文地质条件

1) 地下水类型: 据勘察揭露, 场地内地下水有4层, 主要为第四纪地层中的孔隙水、微承压水和承压水, 稳定水位为0.8~3.40m, 水位标高为46.20~48.82m。

2) 历史水位: 1959年地下水位接近地表, 近3~5年基底所在地层水位绝对标高49m。

3) 综合考虑各种因素, 抗浮设防水位标高定为49m。

2.2 抗拔桩设计方案

该工程有地下三层车库, 一号楼东西两侧地上部分无建筑物, 其中A区面积 $S_A=840\text{m}^2$, B区面积 $S_B=2005\text{m}^2$, 地下建筑物按每层为 $q=20\text{kN/m}^2$ 计算。根据勘察报告及施工经验, 桩的侧限摩擦阻力的加权平均为 $q_{si}=60\text{kN/m}^2$ 。防渗按一级抗裂缝设计(注: 不考虑桩的自重)。

2.2.1 荷载条件

1) 依据勘察报告, 一~三号楼基础埋深12.0m左右, 水头差: $h=49-(51.9-12)=9.1\text{m}$ 。

2) 浮力荷载

基础埋深12.0m, 基底位于重粉质粘土之上。根据有关地下建筑浮力的试验研究^[11], 此基础底部位于渗透性较小的粉质粘土中, 结构所受浮力可以在静水压力的基础上乘以折减系数0.6~0.8, 此处为安全计取 $\xi=0.8$ 。

$$N_{A总} = 0.8 \times \gamma_w \times h \times S_A - 3qS_A = \\ 0.8 \times 10 \times 9.1 \times 840 - 3 \times 20 \times 840 = \\ 10752, \text{kN}$$

$$N_{B总} = 0.8 \times \gamma_w \times h \times S_B - 3qS_B = \\ 0.8 \times 10 \times 9.1 \times 2005 - 3 \times 20 \times 2005 = \\ 25664, \text{kN}$$

3) 总设计荷载(总标准荷载×荷载分项系数×建筑物重要系数)

$$N_{A总设} = N_{A总} \times 1.25 \times 1.1 = 10752 \times 1.25 \times 1.1 = \\ 14784, \text{kN}$$

$$N_{B总设} = N_{B总} \times 1.25 \times 1.1 = 25664 \times 1.25 \times 1.1$$

$$N_{B总设} = 35288, \text{kN}$$

2.2.2 抗拔桩单根承载力设计值计算

1) 单桩抗拔桩承载力设计值

选桩径 $d=400\text{mm}$, 有效桩长为 $l=6\text{m}$

$$R_k = \frac{U_p \times \sum_{i=1}^{n-1} (q_{si} \times h_i)}{K_1} \times K_2 =$$

$$\frac{\pi d \times 60 \times 6}{1.7} \times 0.8 =$$

$$\frac{3.14 \times 0.4 \times 60 \times 6}{1.7} \times 0.8 =$$

$$212.78, \text{kN}$$

式中: K_1 为桩的安全系数, 取1.7; K_2 为抗拔桩的折减系数, 按规范取0.8; R_k 为单桩抗拔力特征值, kN; q_{si} 为第 i 层土侧摩阻力标准值, kPa(根据地勘报告加权取值); U_p 为桩周长; h_i 为第 i 层土层厚;

2) 总桩数

$$N_A = \frac{N_{A总设}}{R_k} = \frac{14784}{212.78} = 70, \text{根}$$

$$N_B = \frac{N_{B总设}}{R_k} = \frac{35288}{212.78} = 166, \text{根}$$

采用正方形网格状布桩, 实际桩间距为 $3.9\text{m} \times 3.9\text{m}$ 。

2.2.3 抗拔桩桩身结构设计

钢绞线承受拉力, 当轴心受拉构件破坏时, 在裂缝截面处混凝土已退出工作, 全部拉力由钢绞线承受, 即

$$R_k \leq n f_{py} A_s$$

式中: n 为所需钢绞线数;

f_{py} 为预应力钢绞线抗拉强度设计值, 选用 $\phi 15.2$ ($f_{py}=1320\text{MPa}$);

A_s 为每束钢绞线的截面积 ($A_s=139\text{mm}^2$)。

$$n = \frac{R_k}{f_{py} A_s} = \frac{212.78 \times 1000}{139 \times 1320} = 1.16, \text{根}$$

但为满足灌注桩的最小配筋率及构造要求, 最终选用主筋 $3\phi 12+3\phi 15.2$ 的钢绞线, $A_s=756.3\text{mm}^2$ (见图3)。

按规范要求抗拔桩通长配筋, 并保证主筋锚入底板 $30d$, 纵向钢筋、钢绞线沿桩身均匀布置, 为了

防止钢筋钢绞线笼腐蚀,钢筋钢绞线笼保护层厚为50 mm,底端为0.5 m,加桩顶0.5 m保护桩,总桩长为7 m,有效桩长为6 m。

箍筋采用 $\phi 6@200$ mm,并采用螺旋式缠绕,在桩顶3~5 d范围箍筋适当加密,钢筋钢绞线笼每隔2 m设一道 $\phi 12$ 焊接加强箍筋。配筋为直径为 $\phi 300$ mm笼子的下端做成一个锥形,将钢绞线用一个U(22)型卡死锁,钢绞线下端1.5 m范围内与混凝土粘结,其余段钢绞线与混凝土非粘结;钢绞在线端锁定在底板上,单根钢绞线的张拉控制应力控制在 $0.75f_{pk}$,桩顶进入底板100 mm(见图3^[12-14])。抗拔桩部位的防水按有关要求执行(在桩顶及四周涮水泥渗透剂,然后在桩的四周做一圈止水带)。

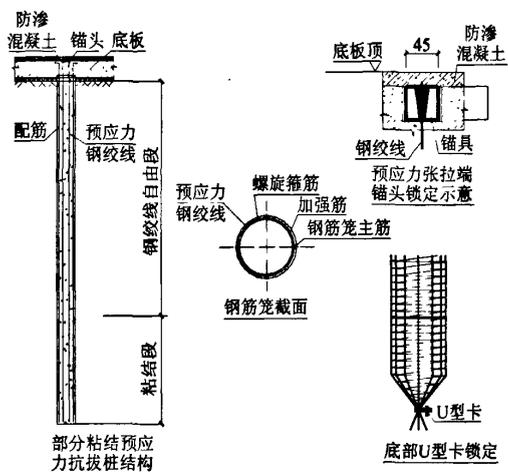


图3 部分粘结预应力抗拔桩结构图

预应力抗浮桩施工时要注意的一些问题可以参看文献[15],以防造成断桩、缩颈等现象,从而影响抗拔桩的施工质量。

桩基材料的受拉承载力为:

$$\lambda_0 R_k \leq f_t A + n f_{pk} A_s$$

式中: λ_0 为建筑物重要系数,取1.1; f_t 为混凝土抗拉强度设计值(C25,取 1.78 N/mm^2); A 为混凝土有效面积,扣除保护层厚度;

代入公式得:

$$1.1 \times 212.78 \times 10^3 \leq 1.78 \times \frac{\pi}{4} \times 400^2 + 1860 \times 137$$

$$234\ 058 \leq 223\ 568 + 254\ 820 = 478\ 388$$

即单桩抗拔承载力远小于钢筋钢绞线混凝土桩抗拉承载力,同时通过施加预应力,可保证桩身混凝土不出现裂缝,解决了抗拔桩主筋锈蚀的问题。

2.2.4 群桩抗拔整体稳定性验算

将桩和桩间土一起结为实体基础,其整体的稳定性应满足整个桩和桩间土构成的实体所受的总的摩擦阻力和浮重应大于总的设计荷载。

$$\text{即满足 } R_{gk} + G' \geq N_{A\text{总设}} + N_{B\text{总设}}$$

式中: $R_{gk} = \sum_n \lambda_i (q_{si} \times l) \times u_i$ 为群桩呈整体破坏时的抗拔承载力标准值;

$$G' = \gamma' V \text{ 为桩间土的浮重;}$$

其中: λ_i 为抗拔系数(取0.75), V 为桩间土的体积, u_i 为A、B区的周长。

通过从桩基平面图上计算A、B区的周长为359 m;

$$R_{gk} = 0.75 \times 60 \times 6 \times 359 = 96\ 930, \text{ kN}$$

$$G' = \gamma' V = (20 - 10) \times 2\ 845 \times 6 = 170\ 700, \text{ kN}$$

$$\text{由 } R_{gk} + G' \geq N_{A\text{总设}} + N_{B\text{总设}},$$

得:

$$96\ 930 + 170\ 700 = 267\ 630, \text{ kN} > 14\ 784 + 35\ 288 = 50\ 072, \text{ kN}$$

即群桩地基抗拔稳定性满足整体稳定性的要求。

经过对原方案优化设计,桩长缩短为原桩长(9 m)的三分之二,桩的数量A区由191根减为70根,B区由553根减为166根,大大降低了工程量,节省了财力物力。

3 结论

地下水抗浮设防水位的合理确定和是否应该对地下结构所受浮力进行折减,一直是岩土工程界存在疑问和纷争的问题。本文通过一些较有说服力的研究成果来对实际工程进行优化设计,对比原工程设计可以看出,在尊重客观实际的前提下,对粘土中的地下结构所受浮力进行折减,保证工程安全的同时可以大大降低工程成本。

参考文献

- [1] JGJ 72—2004 高层建筑岩土工程勘察规范[S].
- [2] 张旷成,丘建金. 关于抗浮设防水位及浮力计算问题的分析讨论[J]. 岩土工程技术,2007,21(1):15-20.
- [3] 黄志仑,马金普,李丛蔚. 关于多层地下水情况的抗浮水位[J]. 岩土工程技术,2005,19(4):182-183;217.
- [4] 张思远. 在确定建筑物基础抗浮设防水位时应注意的一些问题[J]. 岩土工程技术,2004,18(5):227-229.

(下转第3页)

3.5.2 确定压浆管长度

根据等高线图和施工地面标高,按照 1.0m 的高差分压浆管长度范围,与每一根桩对应,列表后交施工组加工压浆管。

4 压浆施工

在基础桩施工 2d 后,可以进行桩侧压浆,间隔 12h 后进行桩端压浆。压浆采用 2DWH-70 型后压浆高压泵,素水泥浆制作使用 JW180 型水泥浆搅拌机;

压浆前,先压清水检查压浆管是否通畅。确认无问题时再将水泥浆液压入压浆管,达到压浆控制指标,即停止注浆。

5 压浆效果

刚开始压浆施工时,由于砂卵石层中孔隙大,压浆为渗透注浆^[3],施工容易,压浆的压力不到 1.0 MPa,随着施工的进展,砂卵石层孔隙被充填,压浆的压力不断提高,压浆的压力可达到 4.0~6.0 MPa,压浆成为压密注浆,所需压浆时间也相应加长。

施工前期,压浆孔的间距控制在 10 m 左右,当钻孔及压浆施工到后期时,注浆影响的范围可达到 30 m;在压浆过程中发生了几次串孔,造成严重塌孔,有两个钻孔施工到砂卵石^⑦时,遇到先期压灌水泥浆形成的凝固体,极难钻进,而且在压浆过程中地

面返浆较普遍,这些现象间接证明压浆效果良好,压浆影响的范围可达 10~30 m。

通过垂直静载荷试验结果证明,基础桩(后压浆的短桩)的承载力均满足设计及有关规范的要求,施工取得圆满成功(见表 3)。

表 3 工程桩垂直静载荷试验结果一览表

试桩编号	桩长 L/m	承载力特征值 R _a /kN	试验荷载 Q/kN	最大变形量 s/mm
TP101	32.80	11 000	26 400	23.95
TP102	32.80	11 000	26 400	13.12
TP103	32.80	11 000	26 400	10.42
TP201	33.90	11 000	26 400	13.12
TP202	34.40	11 000	26 400	13.00
TP203	33.90	11 000	26 400	10.69

参 考 文 献

[1] 吴师彬,高飞. 桩底注浆对钻孔灌注桩竖向承载性能的影响[J]. 岩土工程技术,2006,20(6):320-323.
 [2] 朱奎,周鹏飞. 钻孔灌注桩桩底注浆技术的应用研究[J]. 岩土工程技术,2008,22(1):47-50.
 [3] 张忠苗,邹健. 桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(2):181-184.

收稿日期:2009-06-01

(上接第 213 页)

[5] 杨翠珠. 建筑物基础抗浮设防水位之我见[J]. 岩土工程技术,2007,21(4):176-178.
 [6] 张在明,孙保卫. 地下水赋存状态与渗流特征对基础抗浮的影响. 土木工程学报,2006,34(1):73-78.
 [7] 张在明. 地下水与建筑基础工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
 [8] 张彬. 地下水与地下结构共同作用机理及抗浮优化研究[R]. 博士后出站报告. 北京:清华大学,2006.
 [9] 黄志仑. 关于地下建筑物的地下水水力问题分析[J]. 岩土工程技术,2002(5):273-274;283.
 [10] 李广信,吴剑敏. 浮力计算与粘土中的有效应力原理[J]. 岩土工程技术,2003(2):63-66.
 [11] 张彬,李广信,杨俊峰. 地下水浮力作用机理模型试

验设计实践[J]. 岩土工程技术,2006,20(3):128-131.
 [12] 何世鸣,李江,杜高恒,等. 部分粘结预应力抗拔(浮)桩试验研究及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(增刊)(第十四届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术研讨会论文集):191-196.
 [13] 张洁,尚岳全,林旭武. 考虑上拔力作用点位置影响的抗拔桩变形分析[J]. 土木工程学报,2005,38(7):102-106.
 [14] 李筐,李峰. 抗拔桩设计方法[J]. 中国煤田地质,2003,15(1):48-50.
 [15] 张建青. 首都国际机场停车楼永久性抗浮锚杆施工试验研究[J]. 岩土工程技术,1999(2):30-34.

收稿日期:2009-05-15