

MODFLOW 在北京某工程抗浮分析的应用

刘春¹ 刘培培²

(1. 中兵勘察设计研究院,北京 100053;2. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉),湖北武汉 430074)

【摘要】 简要介绍地下结构浮力研究方面的一些成果。应用 MODFLOW 软件进行数值模拟,结合具体工程进行分析论证,提出抗浮优化设防水位,降低抗浮设防投入。

【关键词】 MODFLOW;数值模拟;抗浮设防水位

【中图分类号】 TU 991.32

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2010.01.001

Application of MODFLOW in Analysis for Prevention of Up-floating of Beijing

Liu Chun¹ Liu Peipei²

(1. China Ordnance Industry Survey, Design & Research Institute, Beijing 100053, China;

2. Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd. Wuhan 430074, Hubei, China)

【Abstract】 Introduce some achievement of the aspect that the buoyancy studies of the underground structure. MODFLOW is applied to numerical simulation to analysis and demonstrate, combining with the concrete project, We suggest that the groundwater level for prevention of up-floating, reduce the investment to anti-uplift.

【Key words】 MODFLOW; numerical simulation; groundwater level for prevention of up-floating

0 引言

城市地下空间的深入开发使建筑物的基础埋深不断加大,随之产生大量的地下水作用问题,尤为突出的是地下结构物的侧壁水压力及基础底部浮力的合理取值问题。近年来,此问题引起了同行的高度关注,并进行了大量的实验研究和探讨,本文运用数值模拟方法,模拟原位试验的地下水渗流特征,把数值模拟应用于实际工程中,为合理确定作用于地下结构物的浮力大小提供参考。

1 抗浮设防水位的研究现状

地下水问题极为复杂,抗浮设防水位究竟应按什么标准确定,浮力是否可以折减问题在岩土工程界引发了广泛的探讨,观点纷呈。张旷成等^[1]认为:某个建筑场地若系在同一地貌单元(或同一个水文地质单元体)上,它只有一个“场地抗浮设防水位”。黄志仑^[2]分析了地下建筑物的地下水扬压力问题,提出在多层地下水情况下,地下结构底板位于不同层位的扬压力计算。并且认为:由于在多层地下水场地可能有多种建筑物,各自有各自的基底埋置深度,可能涉及不同的地下水层而有不同的抗浮设防

水位,因此并不存在统一的场地抗浮设防水位,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^[3]。杨翠珠^[4]分析比较文献^[1]和文献^[3]后,认为不考虑多层地下水的情况,不考虑具体建筑物基础砌筑层地层特性,不考虑地区地下水位变化动态,简单地以场地抗浮设防水位的观点,确定最高设防水位是脱离实际的。无针对特定建筑基底的“场地”抗浮设防水位是盲水位。周载阳^[5]研究了多层地下水的水头分布问题,提出了同一含水层或无越流条件下、有越层渗流条件下及含水层间有不透水层条件下的地下水水头分布模式。李广信^[6-7]分析认为:①地下水中的浮力与地下水的赋存形态及地下水的流动有关,应通过渗流计算分析确定;②将水压力及浮力用孔隙率 n 折减不符合有效应力原理,无论对于粘土还是砂土都无理论依据;③在浮力计算中,侧壁摩擦、饱和粘土中的负孔压及永久排水有利于抗浮,肥槽、垫层及裂隙可能产生很大浮力。杨瑞清等^[8]研究了深圳地区潜水型及滞水型地下水设防水位 h 及抗浮设计水头值 H 的确定原则,探讨了抗浮验算公式,并对浮力折减问题进行了探讨,建议按有

效作用面积系数进行折减。张欣海^[9]结合深圳地区经验,探讨了儿种常见地层结构情况下,地下建筑物抗浮设计水位的取值及浮力折减问题,认为浮力计算时,应根据地下室埋藏深度及所在地层,正确选择抗浮设计水位,并且不同的地层其浮力折减系数也不同。张思远^[10]在分析北京地区典型的水文地质特征基础上,指出了在确定建筑物基础抗浮设防水位时应当注意的几个问题,即:要弄清场地水文地质条件和地下水位的变化规律,重视各含水层间的弱透水层(相对隔水层)对各层地下水水位变化的影响以及了解建筑物基底所在含水层层位及标高等问题。张在明、孙保卫等^①运用室内模拟试验、现场实测、数值模拟以及地理信息系统(GIS)分析等手段,较为系统地研究了“建筑场地孔隙水压力测试方法、分布规律及其对建筑物地基的影响”。认为典型渗流特征及其对建筑物场地孔隙水压力分布规律的影响,是合理确定基底浮力的基础。

在北京地区地面下数十米的深度内,存在多层地下水。各层地下水除了具有水平方向的渗流分量外,在竖向还存在越流补给,即存在竖向的渗流分量。由于渗流作用,地层中的压力水头沿竖向可能呈现非常复杂的分布形态。随着计算数学理论及计算机技术的飞速发展,当前国内外已经出现多种渗流分析软件,如美国的 MODFLOW、加拿大的 SEEP/W、德国的 FEFLOW、日本的 2D-FLOW、3D-FLOW 等来计算土中的渗流问题。

如何合理确定建筑场地的抗浮设防水位,在当今社会有着重要的研究价值和经济价值。基于以上各位专家的观点,本文结合北京市某工程,运用 MODFLOW 渗流分析软件,确定作用于地下结构物的浮力大小,合理确定场地抗浮设防水位。

2 工程应用实例

2.1 工程概况

根据场地岩土工程勘察报告,场区地形平坦,拟建建筑物为纯地下车库(长 132.0 m,宽 31.0 m)。拟建地下车库地上 0 层、地下 2 层,筏板基础,基础埋深-10.4 m(绝对标高 38.0 m)。在钻探揭露深度(20.0 m)范围内,见 2 层地下水,第 1 层地下水类型为潜水,水位埋深为 0.30~5.20 m(标高 42.66~48.49 m);第 2 层地下水类型为层间潜水,水位埋深为 14.40~15.00 m(标高 32.60~33.20 m),赋存于粉细砂层中。地下车库埋深及影响范围内各层土体的分布特征见图 1。

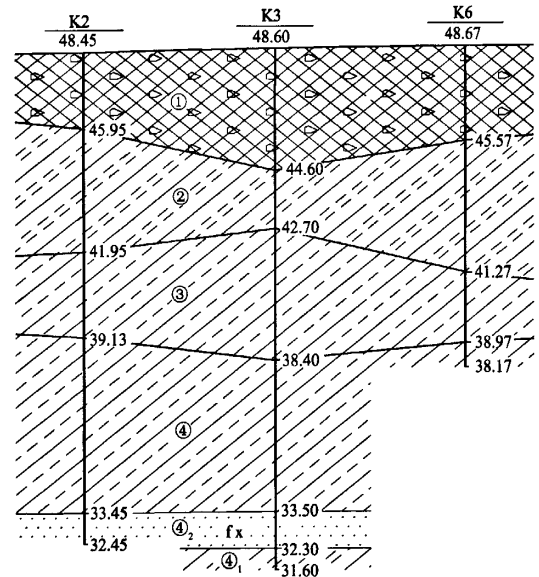


图 1 地层分布特征图

各层土体的物理性质指标见表 1。

表 1 各层土体的物理性质指标

土样名称	含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙率 $n/\%$	饱和度 $S_r/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 I_L	渗透系数	
							$k_h/(cm \cdot s^{-1})$	$k_v/(cm \cdot s^{-1})$
粘质粉土②	22.8	2.01	39.3	94.7	8.8	0.38	5.54×10^{-5}	4.65×10^{-5}
粉质粘土③	23.2	2.02	39.6	95.4	11.6	0.59	4.85×10^{-7}	3.75×10^{-7}
粉质粘土④	23.8	2.00	40.5	95.0	11.6	0.53	2.95×10^{-7}	1.69×10^{-7}
粘质粉土④ ₁	22.4	2.02	38.8	93.2	8.5	0.43		

2.2 渗流模型建立

场区存在两层地下水,二者间存在越流补给;地下室基础埋深-10.4 m,位于粉质粘土④层中。根

据场区土层渗透特性的不同和模拟需要,将场区地层概化为 6 层。计算模型空间上的离散包括平面网格剖分和垂向分层,平面上共剖分网格 75×90 个,剖

①北京市勘察设计院. 建筑场地孔隙水压力测试方法、分布规律及其对建筑地基影响的研究(1996—1999)[R]. 1999.

分的单元格大小为 $2\text{m} \times 2\text{m}$;垂向上共概化为 6 层。

由上面分析可知,地下水水平方向流动对浮力作用影响不大,主要是垂向渗流起作用。因此,模型周边均作为隔水边界,模型内部将地下室整个作为隔水边界,模拟稳定渗流的情况。

计算中渗透系数 k 值按表 1 所给出的数据依据,结合模型反演分析综合取值,给水度 μ 及储水系数 S 根据经验取值。将钻孔勘探获取的地下水位数据,通过插值或趋势分析方法得到各单元地下水水位埋深,以此作为初始水头赋值于计算模型进行模拟计算。

2.3 渗流过程模拟

模拟过程中运行 MODFLOW 和 ZONE BUDGET 两个模块,调用 BAS、BCF 及 PCG(或 WHS)子程序包,经过迭代运算求解地下水水头。

2.4 渗流模拟结果与分析

为了清晰反映地下水渗流特征,分别模拟原始场地和建造地下室后的场地现状水位及场地地下水位升高几种情况。原始场地垂向剖面地下水水头等值线图见图 2。

修建地下车库后所在场地垂直剖面上地下水水头等值线图见图 3。

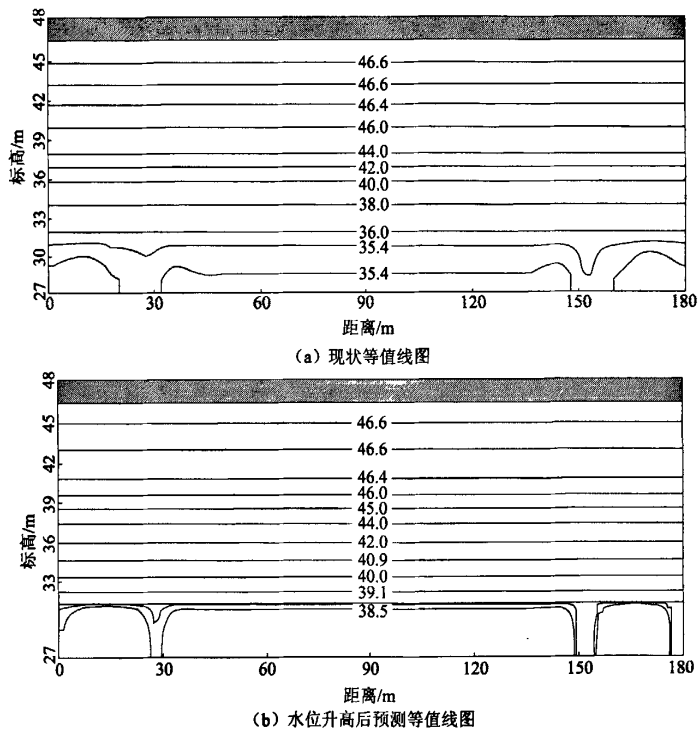
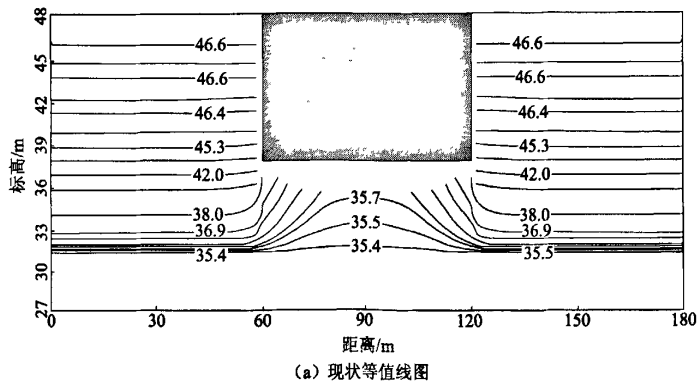


图 2 地下水水头垂直剖面等值线图(原始场地)



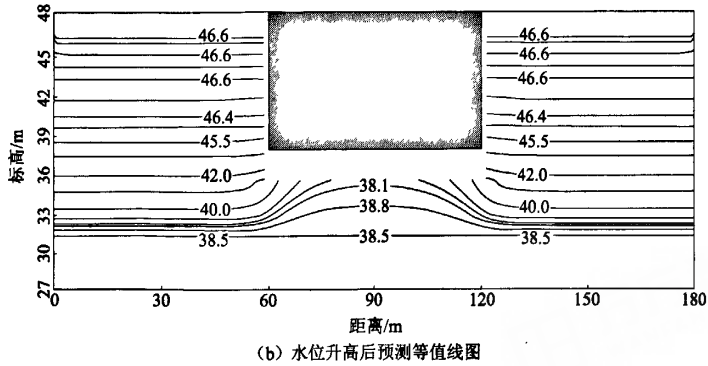


图3 地下水水头垂直剖面等值线图(建造地下车库后)

由图2、图3可以看出,地下车库的建造明显改变了建筑场地内地下水水位,尤其是在地下室底板下一定区域地下水水头明显降低,表现为作用于地下室底板上的地下水浮力下降。

场地实测孔隙水压力曲线沿土层垂向分布规律见图4。由分布曲线可见,上部②层粉土中实测孔隙水压力曲线基本和按最高静水位求得理论曲线吻合,进入下部④层粉质粘土中,孔隙水压力出现明显折减,实测曲线出现明显偏离理论曲线趋势,直至④层粉质粘土以下砂层中,孔隙水压力仅为10 kPa,远低于按场地内最高水位求得理论值。同时,原位试验反映的规律同张枋^[13]大型室内模型试验得到的结果具有很好的相似性。

实测孔隙水压力分布曲线与渗流模拟结果计算曲线对比见图5。由图5可见,通过渗流模拟求得的孔隙水压力值同实测值较好地吻合,证实渗流

模型建立的合理性。同时,按场地最高水位求得的理论静水压力明显高于孔隙水压力现场测试值,若以此作为地下水浮力荷载势必造成不必要的浪费。

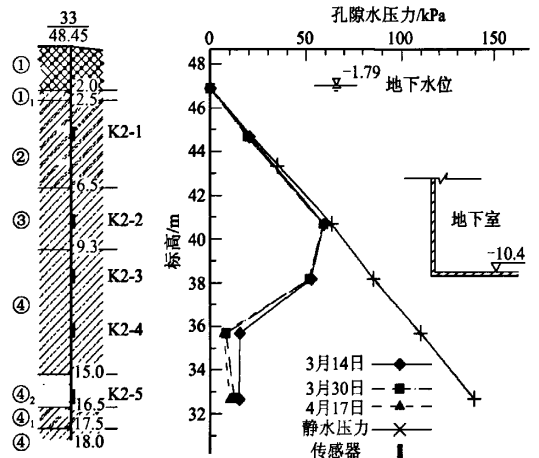


图4 孔隙水压力沿土层垂向分布规律(K2孔)

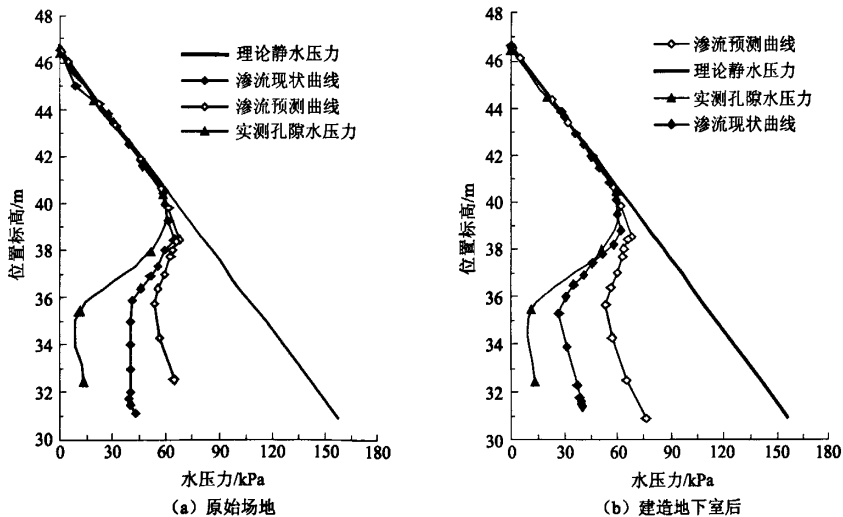


图5 孔隙水压力垂向分布曲线

2.5 确定等效抗浮设防水位

确定地下结构上浮力荷载及等效抗浮设防水位的基本思路为:①勘察期间进行细致的地下水水位分层观测,了解场地地下水赋存及运动特征等背景资料;②进行孔隙水压力原位测试,以此数据为依据反演渗流模型计算参数,优化模型边界条件;③基于已建立的渗流模型,考虑各种不利因素下地下水水

位可能上升的高度,通过渗流模拟预测浮力荷载;④将浮力预测值换算为等效抗浮设防水位,为结构设计提供参考。

采用上述工作思路,确定该工程等效抗浮设防水位,见表2。通过上述优化过程,该工程的等效抗浮设防水位由原来的47.0m优化为45.0m,合理地降低了浮力荷载,节省了投资,节约了工期。

表2 浮力及等效抗浮设防水位计算结果表

现状地下水水位/m		传统抗浮设防水位/m	传统浮力荷载/kPa	实测孔隙水压力/kPa	孔压渗流计算/kPa		等效抗浮设防水位/m
第1层水	第2层水				现状值	预测值	
46.5	34.5	47.0	90.0	51.24	52.5	64.0	45.0

注:地下室底板标高38.0m

需要说明的是:等效抗浮设防水位同具体的地下室结构埋设位置有关,同一建筑场地因地下结构埋设位置不同,将对应不同的等效抗浮设防水位。而传统方法确定建筑场地抗浮设防水位则不能考虑地下结构埋设位置的影响,通常一个场地即对应一个统一的抗浮设防水位,这样很多情况下都会得出偏大的浮力荷载,造成不必要的浪费。

3 结论

合理确定地下结构的抗浮设防水位,是近年来一直探讨的问题,本文通过运用MODFLOW渗流分析,确定北京市某工程场地地下结构物的抗浮设防水位,证明了此种方法的可行性,也有效降低了抗浮设防投入,具有一定的经济价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 黄志仑.关于地下建筑物的地下水扬力问题分析[J].岩土工程技术,2002(5):273-275.
- [3] 黄志仑,马金普,李丛蔚.关于多层地下水情况下的抗浮水位[J].岩土工程技术,2005,19(4):182-217.
- [4] 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.
- [5] 周载阳.多层地下水的水头分布[J].岩土工程技术,2003(2):67-68.
- [6] 李广信.基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J].岩土工程学报,2000,22(3):348-353.
- [7] 李广信,吴剑敏.浮力计算与粘性土中的有效应力原理[J].岩土工程技术,2003(2):63-66.
- [8] 杨瑞清,朱黎心.地下建筑结构和施工设防水位的选定与抗浮验算的探讨[J].工程勘察,2001(1):43-46.
- [9] 张欣海.深圳地区地下建筑抗浮设计水位取值与浮力折减分析[J].勘察科学技术,2004(2):12-20.
- [10] 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.
- [11] 张在明,孙保卫,徐宏声.地下水赋存状态与渗流特征对基础抗浮的影响[J].土木工程学报,2001,34(1):73-78.
- [12] 张在明.北京地区高层和大型公用建筑的地基基础问题[J].岩土工程学报,2005,27(1):1-13.
- [13] 张彬.地下水与地下结构共同作用机理及抗浮优化研究[R].清华大学博士后研究报告,2006.

收稿日期:2009-10-27