

地下水位回升对筏板基础安全与抗浮设防水位的影响研究

胡鸿伟¹, 张卫兵^{1,2}, 王嘉鑫¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 旱区现代农业水源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为了分析地下水位回升对筏板基础安全与抗浮设防水位的影响,以银川金凤区小高层住宅为研究对象,基于 Abaqus 建立二维浅基础流固耦合模型,分析土体固结前后不同地下水位埋深对筏板基础有效应力分布与沉降的影响规律,进而提出合理的抗浮设防水位建议。结果表明:当地下水位埋深大于基础埋深时,基础应力与沉降变化均较小;而当地下水位由基础底面下 0.3 m 上升至其上 1.7 m 时,沉降急剧减小,基础上浮趋势显著,此后沉降仅呈微弱减小。基于上述规律,建议小高层住宅的抗浮设防水位应设于基础底面以下至少 0.3 m,以保证建筑结构安全与耐久性。

关键词: 地下水回升;筏板基础;流固耦合;数值模拟;抗浮设防水位

中图分类号: TU478

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0129-08

Response Analysis of Small High-rise Residential Foundations to Groundwater Recovery

HU Hongwei¹, ZHANG Weibing^{1,2}, WANG Jiixin¹

(1. College of Civil Engineering and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Area of Ningxia University Engineering Research Center of Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To analyze the impact of groundwater level recovery on the safety of raft foundations and the anti-buoyancy design water level, this took small high-rise residential buildings in Jinfeng District, Yinchuan city as an example, a two-dimensional shallow foundation fluid-structure coupling model was established based on Abaqus to analyze the influence of different groundwater level buried depths on the effective stress distribution and settlement of raft foundations before and after soil consolidation, and then proposed reasonable suggestions for anti-floating waterproof positions. The results show that when the buried depth of groundwater level is greater than that of foundation depth, the changes of foundation stress and settlement are small. When the groundwater level rises from 0.3 m below the bottom of the foundation to 1.7 m above it, the subsidence decreases sharply, and the floating trend of the foundation is significant, and then the subsidence only decreases slightly. Based on the above law, it is recommended that the anti-floating waterproof position of small high-rise residential buildings should be set at least 0.3 m below the bottom of the foundation to ensure the safety and durability of the building structure.

Keywords: groundwater recovery; raft foundation; fluid-structure interaction; numerical simulation; anti-float water level

近年来由于极端降水、气候变化、开采管控,导致城市地下水位持续升高,如郑州“7.20”暴雨单日灌入 106 个西湖水量,地下水系统超负荷;兰州由于祁连山冰雪融水地下水位年均升 0.5 m;银川市供水方式从地下水到黄河水的转变^[1],地下水位平均上升了 5.45 m^[2]。然而,随着地下水埋深的持续上升,原本不需要抗浮设计或者只通过增加配重即可满足抗浮设计的建筑物,现难以满足抗浮设计要求^[3]。

由于土体与上部荷载、地下水之间的相互作用关系复杂,尤其在地下水埋深变化对建筑物基础的影响方面,传统的理论分析方法难以准确解析三者之间的关系。同时考虑到在多孔介质中,水流的流动特性受骨架岩土性质和流体性质的共同影响^[4],而有限元数值模拟方法能够有效分析流固耦合问题。目前,关于地下水对建筑基础影响的数值模拟在理论基础、方法论及实际应用方面已达到较高水平。潘健等^[5]通过对非均质地基上条形基础的弹性沉降进行了确定性与随机有限元分析,采用了常规有限元法(FEM)和随机有限元法(SFEM),为地基沉降的概率分析提供了更合理的分析方法。张沛等^[6]通过数值模拟和理论分析的方式,为能量桩群桩基础的沉降特性分析提供了新的分析手段。胡小荣等^[7]在弹塑性理论的框架下,建立了非饱和土的广义有效应力三剪弹塑性本构模型,验证了该本构模型的正确性。Alencar 等^[8]使用有限差分法研究了地下水位对岩体浅基础极限承载力的影响,以半解析方式估计考虑自重和 GWL 影响的岩体承载力。以半解析方式估计考虑自重和 GWL 影响的岩体承载力。Dingfeng 等^[9]进行了室内模型试验和现场监测试验,发现钙质砂地基的每日周期性变化的原位变形主要发生在最高和最低地下水位之间。

以上关于地下水位变化对建筑基础的影响分析主要集中在基础沉降变形^[10]、沉降算法优化^[11]以及地基承载力^[12]的研究,而对于地下水位埋深变化对运营中的小高层住宅筏板基础的应力分布特征及沉降演变规律研究较少。因此,本文基于工程地质勘测报告,以研究区的小高层住宅为研究对象,采用 Abaqus 有限元分析软件,构建二维浅基础流固耦合数值模型,并结合建筑物沉降观测报告,验证模型的可靠性,在此基础上,进一步探究地下水位波动对建筑基础应力分布特征及沉降演变规律的影响,并提出合理的抗浮设防水位建议。

1 工程概况

1.1 研究区范围及工程地质与水文地质情况

研究区位于银川市金凤区,银川平原的中部,西侧紧邻凤凰北街,与北师大银川学校相望,南距阅海万家 F3 区约 1 km,北侧距沈阳中路约 1 km,东侧距唐徕渠约 2 km,见图 1 所示。

研究区包括 22 幢住宅楼(有地下室)、5 幢商业建筑和一座地下车库构成,用地面积 85 379.97 m²,总建筑面积 190 079.93 m²。其中住宅楼构造为剪力墙结构,筏板基础,基础埋深 5.70 m。

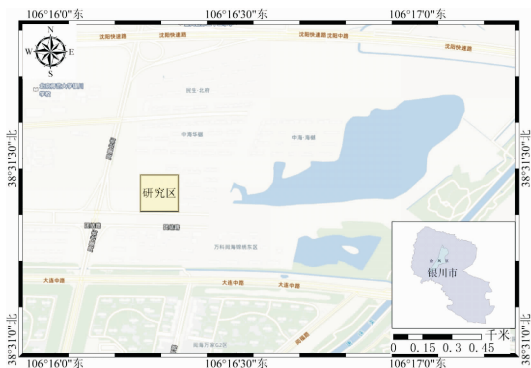


图 1 勘测地点位置图

银川平原土层厚度大,层位稳定,土质密实且均匀。该区域在地貌上属黄河冲积平原二级阶地,无不良工程地质作用^[13]。根据钻孔揭露,场区地层除浅层分布杂填土、素填土外,其余以黏性土、砂土为主,如图 2 所示。丰水期,受农田灌溉的影响,水位埋深 5.30 ~ 7.80 m,平均值 6.70 m,枯水期水位降幅在 0.50 ~ 1.50 m 左右。

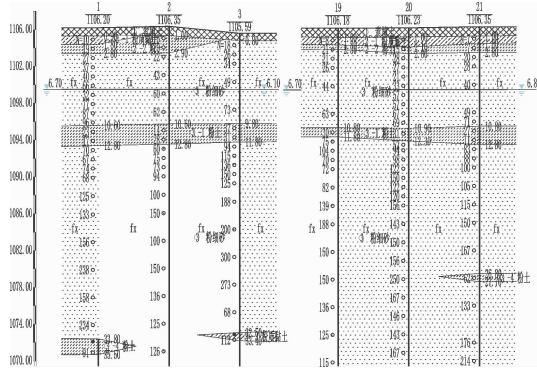


图 2 工程地质剖面图

1.2 建筑物沉降监测

沉降过大或沉降不均匀,就会使建筑物倾斜、位移、甚至使其产生裂缝乃至破坏。所以沉降观测的

是验证设计理论和检验施工质量的重要资料。研究区建筑依据《建筑变形测量规范》^[14] (JGJ 8—2016) 建筑物观测点布设在筏基的四角和中部位置处共计6个监测点如图3所示。

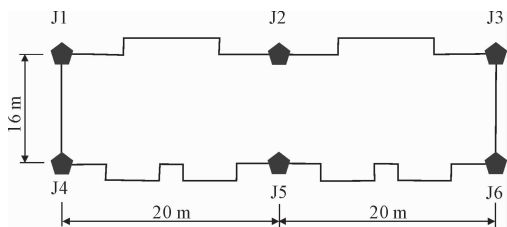


图3 建筑物沉降观测点位置图

按照图3沉降观测点位置相对应的6~11层住宅楼从施工到沉降稳定状态后的基础累积下沉量如图4所示。

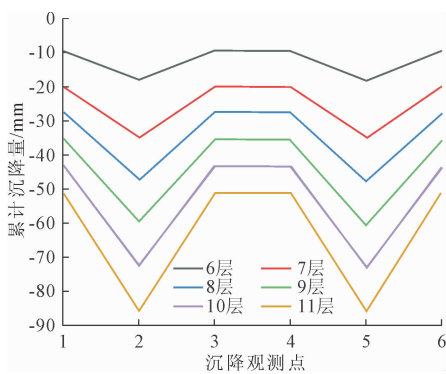


图4 不同层数住宅基础累积下沉量

图4中,建筑中部的沉降量大于角点沉降量,主要是因为建筑物基础为筏板基础,基础刚度较小,易发生变形,并且研究区地基以砂土为主,土体压缩性高。

2 数值建模及分析

2.1 模型的建立

以研究区的小高层住宅为研究对象,采用Abaqus有限元分析软件构建二维流固耦合数值模型。同时,考虑建筑物影响范围外的土体边界效应,通过参数敏感性分析与模型验证,确定数值模型的几何尺寸为100.0 m(长)×35.5 m(高),其中基础埋深设定为5.7 m,地下水浸润面深度为6.7 m,如图5所示。模型采用CPE4P(孔隙流体/应力耦合)单元进行网格划分。

在基础底部施加均布荷载,模拟基础及地基对建筑物自重的力学响应。同时对模型边界条件进行设定:以地下水埋深面为界,将土体划分为上部非饱和区和下部饱和区两部分;模型左右两侧施加横向

位移约束($u_x = 0$),底部边界施加全位移约束($u_x = u_y = 0$)。

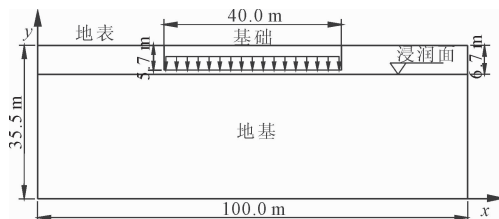


图5 数值模型示意图

为了方便在数值模拟中对关键问题的研究,对模型做如下假定:①采用二维平面模型,假设土体每一层均为等厚分布,且各层土为参数一致的各向同性材料;②模拟过程中土结构的应力应变均在弹塑性范围以内;③初始地应力平衡仅考虑土体自重的影响。

2.2 计算参数取值

建筑基础所承受的荷载主要包含恒荷载(如结构自重、固定设备重量等)、活荷载(如人员活动、可移动家具及设备重量等)以及环境荷载(如风荷载、地震作用等),这些荷载通过上部结构传递至基础底面,最终作用于地基^[15]。本研究依据《建筑地基基础设计规范》^[16] (GB 50007—2011)与《建筑结构荷载规范》^[17] (GB 50009—2012)对建筑物地基的平均荷载进行估算。研究对象为剪力墙结构,筏板基础,经计算,单层建筑传递至地基基底的均布荷载约为20 kPa,六层建筑传递至地基的总均布荷载约为120 kPa。此外,考虑到建筑使用期间的人员活动荷载及自然环境因素的综合影响,活荷载估算值为30 kPa。基于上述分析,建筑物对地基的总均布荷载约为150 kPa。

砂土的渗透系数 k 与有效粒径 d_{10} 有关,本文按《工程地质手册》第五版^[18]的经验公式取用,如下式:

$$k = Cd_{10}^2(0.7 + 0.03t) \quad (1)$$

式中: C 为常数,按纯砂中值考虑取900(不均匀系数3.8); t 为渗透水温,取15°; d_{10} 为颗粒的有效粒径, d_{10} 取平均值0.070计算; k 为渗透系数,为 5.5×10^{-3} cm/s(4.752 m/d)。

地基土体采用Mohr-Coulomb模型^[19],土体的材料性能参数如表1所示^[20]。

2.3 分析方法

考虑到Geostatic分析步,可准确、灵活建立湿土(考虑静水压力的影响)和干土(不考虑静水压力

的影响)初始应力状态,使土体在自重以及自应力作用下达到初始应力平衡状态;而 Soil 分析步提供了针对非饱和土的渗流分析功能,能够求解孔压、沉

降随时间的变化过程。模型涉及到联合渗流问题,同时包含饱和以及非饱和渗流,因此本文采用 Geostatic 分析步和 Soil 分析步相结合进行数值模拟。

表 1 土体计算参数表

编号	岩土名称	H/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	E/MPa	$S_r/\%$	c/kPa	μ	$\varphi/(^\circ)$	e_0	a_i/MPa
1	①素填土	0.9	20.5	6.30	85	27	0.3	21.0	0.566	0.25
2	②-1 粉质黏土	0.9	20.5	8.50	82	28	0.3	21.0	0.553	0.16
3	②-2 粉土	1.0	19.9	14.94	79	17	0.3	27.0	0.590	0.09
4	③-1 粉土	7.8	21.3	14.14	99	18	0.3	28.0	0.514	0.08
5	③-2 粉质黏土	2.2	21.1	12.10	99	29	0.3	23.0	0.535	0.10
6	③-3 粉细砂	21.0	17.4	16.28	98	25	0.3	33.8	0.596	0.07
7	③-4 粉细砂	1.7	20.1	16.41	94	43	0.3	10.2	0.604	0.06

注: H 为平均厚度, γ 为土体重度, S_r 饱和度, E 为弹性模量, c 为黏聚力, μ 为泊松比, φ 为内摩擦角, ψ 为剪胀角, e_0 为孔隙比, a_i 为压缩系数。剪胀角的取值若与摩擦角一致,则表示剪切破坏会导致体积无限膨胀的现象,因此本工程中剪胀角 ψ 取值根据工程经验取为摩擦角 $1/2$ 。

在 Step-1 Geostatic 分析步中,对模型的初始条件进行设定,使土体在自重以及自应力作用下达到初始应力平衡状态,主要包括初始孔隙比、初始孔隙水压力、地应力、初始饱和度。孔隙水压力通过构建解析场,控制孔压初始状态,使静水压力达到平衡;为了实现地应力平衡,通过直接指用单元应力来构建各土层的初始应力场;其余各项均按照表 1 参数进行设定。

在 Step-2 Soil 瞬态分析步中,在基础表面设置均布荷载,模拟建筑物自重对土体的影响,浸润面不进行额外设置(默认不排水),同时通过制定随高程线性变化的孔压,将浸润面以下地基边界设置为补水边界。

在 Step-3 Soil 稳态分析步中,将地表孔压为零,即地表定义为排水边界(drainage-only flow),分析步长设置为 20 d,模拟土体孔压消散和固结过程。

3 模拟结果与分析

3.1 模拟结果

基于数值模拟结果,地下水埋深为 6.7 m 时,六层住宅建筑(基础荷载 150 kPa)基础,土体固结沉降前后的应力及沉降竖向分布云图如图 6 所示。从横向来看,基础底面的应力与沉降呈现“中间大、两端小”的空间分布规律,这一现象主要由于建筑为柔性筏板基础以及砂土具有较高的压缩性,建筑荷载与地下水浮力的综合作用。从纵向分析,由于地下水的浮托效应与建筑物及土体自重达到力学平衡状态,基础以下土层应力呈现波浪状向上衰减,而沉降则表现为波浪状向下递减。在地表两端基础两侧区域,由于地下水浮力的作用,应力呈现正值,导致土层出现隆起现象,这一特征与所建立的弹性力学模型具有良好的一致性。随着土体固结,土体密实



(a) 固结前竖向应力云图



(b) 固结前竖向沉降云图



(c) 固结后竖向应力云图



(d) 固结后竖向沉降云图

图 6 地下水埋深 6.7 m 浅基础固结前后应力、沉降云图

度提高,基础底部应力相应减小,沉降现象得到有效缓解,地基整体稳定性得到提升。

3.2 模型验证

以地下水埋深为 6.7 m 的建筑作为研究对象,基于 Abaqus,对基础底部施加逐级递增的荷载条件,分别施加 150、170、190、210、230 和 250 kPa 的均布荷载,分别模拟 6 层至 11 层建筑对基础底部产生的均布荷载效应,所得不同荷载工况下基础埋深面固结前后的沉降差值如图 7 所示。

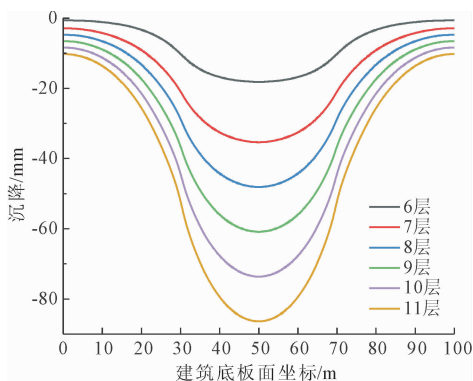


图7 不同荷载的基础埋深面的沉降关系曲线

为了评估模型的预测精度和可靠性,以图 3 实测点的位置为横轴,并截取相应位置模拟结果的沉降数据,将实测结果与模拟结果对应位置数据作差为纵轴,绘制不同层数住宅的模拟与实测沉降差值图,如图 8 所示。

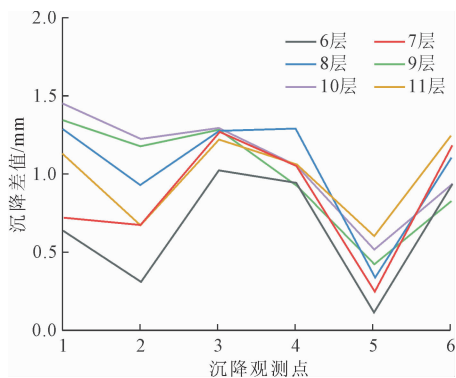


图8 模拟与实测沉降差值

结果表明,住宅层数越低,模拟与实测沉降差值越小,模型的准确度越高,住宅中部观测点 J2、J5 差值分别在 1.3、0.6 mm 以内,角点 J1、J3、J4、J6 的差值也在 1.4 mm 左右,中部模拟效果要优于角点,但总体来看,Abaqus 数值模拟结果与实测结果差值在 5% 以内,说明模型在模拟建筑物基础对地下水响应方面的具有较高的准确性。然而,现有研究仅局限

于地下水埋深 6.7 m 单一的条件,未能全面反映地下水埋深变化对基础的影响。鉴于此,在上述研究基础上,通过改变地下水埋深,进一步探究地下水埋深变化与建筑基础应力分布、沉降演变之间的规律,并提出合理的抗浮设防水位取值建议。

4 抗浮设防水位的合理取值分析

4.1 抗浮设防研究方案

以地下水埋深作为地下水变化的控制参数,通过控制变量法以及正交试验设计原理,设计试验方案。

4.1.1 地下水埋深方案

以历年地下水埋深观测数据为基础,结合工程实际工况,并考虑极端工况(如地震或洪水),选取水位埋深分别为 8、6、4、2、0 m(上部荷载恒定为 150 kPa),系统分析不同埋深条件下基础的力学响应特征。

4.1.2 地下水埋深与上部荷载交互试验方案

为了进一步研究地下水埋深与建筑物上部荷载耦合作用下对基础的影响,基于正交试验设计原理,构建 36 交互工况的试验方案,进一步分析地下水埋深和上部荷载耦合作用下建筑物基础的应力分布特征及沉降演变规律。

4.2 地下水埋深的影响

根据数值模拟结果,绘制不同地下水埋深的土体固结前后基础埋深面的应力与沉降的应力与沉降差值曲线,如图 9 所示。结果表明,各工况下的应力、沉降曲线呈现相似的变化趋势,应力与沉降分布特征可依据基础埋深 5.7 m 为界划分为两个区域。当地下水埋深位于 5.7 m 以下时,基础的应力与沉降变化量较小,而当水位超过基础底部时,形成了典型的“水盆效应”,导致基础的浮托作用显著增强,应力与沉降变化量大幅降低。同时,当地下水埋深达到 6 m 时,基础底部应力值最大,这表明此时水浮力并不能完全抵消建筑物的自重荷载。

为进一步阐明地下水埋深对基础应力分布特征及沉降演变规律,提取了基础底部中点处的应力与沉降数据进行深入分析,如图 10 所示。

当地下水位埋深在 0~8.0 m 区间,应力与沉降曲线呈现明显的阶段性变化特征。第一阶段,地下水埋深从 8.0 m 上升至 6.0 m,土体饱和度增加,孔隙水压力上升,有效应力增大,进而引发土体湿化膨胀现象,基础轻微上浮;第二阶段,地下水埋深从 6.0 m 上升至 4.0 m,水位逐渐没过基础底面,形成“水

盆效应”^[21],建筑物基础受水浮力作用显著,同时,在地下水埋深 6.0 m 处应力达到峰值,随后基础及周边土体有效自重减小,基础底部出现应力释放,诱发“卸荷回弹”现象,土层应力急剧下降,基础上浮显著;第三阶段,地下水埋深从 4.0 m 上升至地表,随着地下水位的持续上升,上覆土层的重量增加,变形模量减小,土体产生附加下沉,但变形量相对较小。

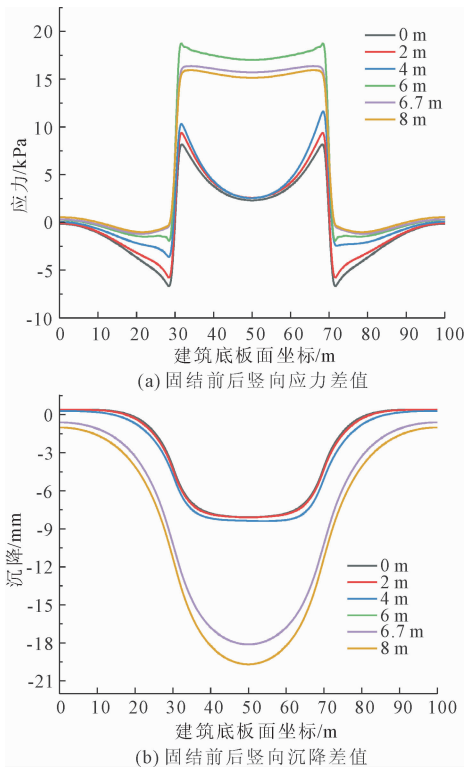


图 9 不同地下水埋深基础埋深面的应力、沉降差值曲线

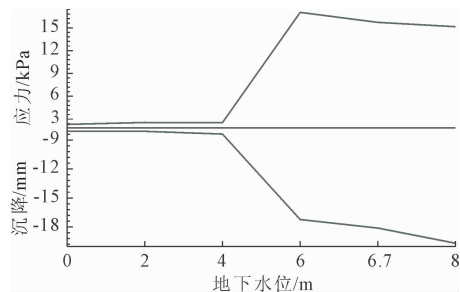


图 10 不同地下水埋深的地基底部中点的应力、沉降

4.3 地下水埋深与上部荷载耦合结果分析

为进一步研究地下水埋深与建筑物上部荷载对地基应力和沉降的相关性以及影响,按照地下水埋深与上部荷载进行交互方案设计,总计 36 个方案,分别进行模拟分析,随后将模拟结果中,基础底面中点固结前后的应力、沉降差值进行提取分析,其应

力、沉降曲线如图 11 所示。

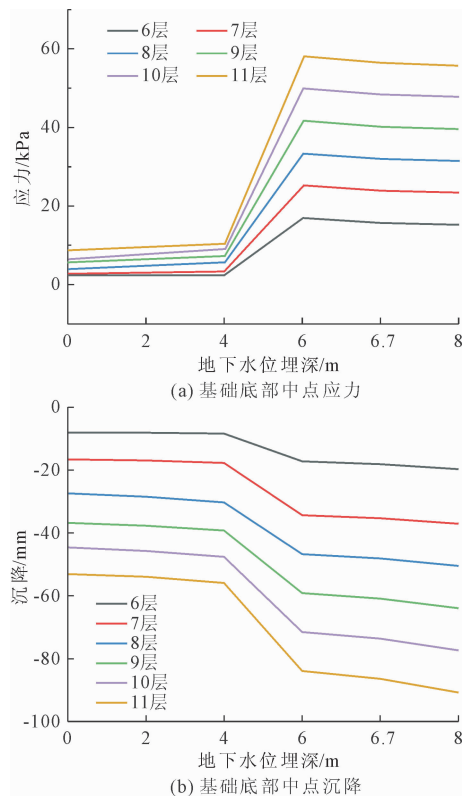


图 11 地下水、上部荷载耦合作用基础底部中点固结前后的应力、沉降差值

总体来看,不同地下水埋深与上部荷载耦合作用下基础埋深处的应力与沉降变化呈现显著的一致性,且随荷载增加,沉降量呈正相关增长。基础应力峰值出现在地下水埋深 6 m 处;当地下水埋深由 6 m 上升至 4 m 时,基础应力与沉降均出现明显波动。这一现象进一步证实了地下水水位上升与建筑荷载的耦合作用会引发基础应力与沉降的波动变化,从而对建筑物及其周边基础设施产生影响。这一发现为建筑的抗浮设防水位以及类似工程的抗浮水位设计优化提供了重要的理论依据。

为深入探究地下水埋深与上部荷载对应力及沉降的相关性及其影响程度,采用偏相关分析方法,对交互试验方案下基础底部的应力及沉降数据进行系统筛选,共获取 1 473 个有效样本进行定量分析(详见表 2)。

根据表 2 的统计分析结果显示,地下水埋深、上部荷载与基础底部中点的应力及沉降之间的显著性 p 均为 $0 < 0.01$,表明这些变量之间存在极显著的相关性。在控制上部荷载变量的条件下,地下水埋深与基础底部应力、沉降的 Pearson 相关系数分别为 0.780 和 0.769 ($r > 0.5$);而在控制地下水埋深变量

的条件下,上部荷载与基础底部应力、沉降的相关系数分别为 0.687 和 0.919 ($r > 0.5$)。这些数据表明,基础应力及沉降与地下水埋深、上部荷载均呈现显著的正相关关系,这一结论与图 11 所示的基础底部中点应力及沉降曲线特征相吻合。

表 2 地下水埋深、上部荷载与地基应力、沉降的相关性

控制变量			基础应力	基础沉降
上部荷载	地下水埋深	相关性(r)	0.780	0.769
		显著性(p)	0.000	0.000
		自由度(n)	1473	1473
地下水埋深	上部荷载	相关性(r)	0.687	0.919
		显著性(p)	0.000	0.000
		自由度(n)	1473	1473

4.4 抗浮设防水位取值建议

地下水埋深的变化对土体孔隙水压力产生显著影响,不仅影响土体有效应力状态的改变,更通过有效应力路径的改变对地基承载力产生影响^[22]。关于基础抗浮失效的演化机制,研究表明,其过程可分为两个特征性阶段:在第一阶段,当地下水埋深维持在 6~8 m 范围内时,建筑自重与水浮力处于相对平衡状态,此时地下水位波动仅导致基础沉降的微量变化,而不会引发显著的上浮现象;在第二阶段,当地下水埋深超过 6 m 临界值时,建筑自重无法有效平衡水浮力,地下水位上升将导致建筑基础沉降量的急剧变化,可能导致建筑基础产生变形^[23]。

因此,对于研究区的抗浮设防水位应设置于建筑基础底面以下至少 0.3 m,有效规避地下水浮力对建筑基础的不利影响,定期采集研究区的地下水位和基础沉降情况,通过排水系统(如井点降水、盲沟排水)对地下水位埋深进行动态控制,以确保建筑物的结构安全性和耐久性。同时,建议在相关设计规范中补充关于地下水埋深动态变化条件下基础设计与校核的具体技术标准,在类似工程的抗浮设计水位中考虑地下水位变化的可能性,选择合适的基础类型和埋深,从而提升工程的安全储备系数。

5 结论

本文基于 Abaqus 软件构建二维浅基础流固耦合模型,研究土体固结前后小高层住宅在不同地下水埋深下的应力分布特征及沉降演变规律,得到以下结论:

(1) 对于 6~11 层小高层建筑,基础应力及沉降与地下水埋深、上部荷载均呈现显著的正相关关

系,过程可分为两个特征性阶段:①当地下水埋深 6~8 m 时,筏板基础应力与沉降变化幅度较小;②当地下水埋深在 4~6 m 时,地下水逐步浸没基础,形成“水盆效应”,导致基础上浮现象加剧。并且应力在地下水埋深 6 m 时达到峰值,随后出现应力释放现象,引发“卸荷回弹”效应。

(2) 建议研究区的抗浮设防水位应设置于建筑基础底面以下至少 0.3 m,避免地下水位变化引起基础过大的沉降量或沉降差,影响建筑物的稳定性和安全性。

参考文献:

- [1] 张 钦,张 黎,张 钦,等. 银川平原主要水环境问题及其对策[J]. 地球科学与环境学报,2010,32(04): 392-397.
- [2] 银川第三季度地下水超采区水位上升 5.45 米[EB]. 宁夏回族自治区水利厅. http://www.ycen.com.cn/xwzx/rd/202012/t20201203_103086.html.
- [3] 黄 健,光 军. 建筑结构的抗浮设计探讨[J]. 建筑结构,2021,51(10):135-139.
- [4] 黄亦章,史玉金,陈锦剑,等. 深层地下水回灌对高架桩基长期沉降的影响[J]. 上海交通大学学报,2016,50(03):324-330.
- [5] 潘 健,周 森. 非均质地基上条形基础沉降的随机有限元分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(S2):196-199.
- [6] 张 沛,石雨恒,费 康. 能量桩群桩基础沉降特性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2022,44(01): 75-86.
- [7] 胡小荣,路 祥,蔡晓锋. 非饱和黏性土的广义有效应力三剪弹塑性本构模型[J]. 工程力学,2024,41(05): 107-119.
- [8] Alencar A, Galindo R, Melentijevic S. Influence of the groundwater level on the bearing capacity of shallow foundations on the rock mass[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021,80(09):1-11.
- [9] Dingfeng C, Kumar S S, Linqing Y, et al. Responses of calcareous sand foundations to variations of groundwater table and applied loads[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(04): 1266-1279.
- [10] 孙向军,李 倩,贾长华,等. 隧道下穿段堤防后期沉降及地下水位变化规律研究[J]. 水利与建筑工程学报,2026,24(01):206-211,222.
- [11] 王文泽,周雄雄,毛拥政,等. 采空区地基沉降作用下埋地波纹管力学响应计算方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(06):128-135.
- [12] 田瑞端,肖见航,王晓睿. 特大暴雨引起的深基坑变

