

DOI: 10.11779/CJGE201904022

承压水越流对地下结构浮力影响试验研究

木林隆^{1,2}, 王 乐^{1,2}, 黄茂松^{1,2}, 何彦承^{1,2}, 康景文³

(1. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要: 针对承压水地层中地下结构受到浮力预测不准确的问题, 开展存在地下结构的土层中竖向渗流模型试验, 考察不同环境中的承压水渗流对地下结构的浮力影响。主要探讨不同水力梯度下均质土层中竖向渗流及承压水向上穿越弱透水层渗流时, 所产生的孔隙水压力变化规律及其对地下结构的浮力的影响特点。试验表明: 存在渗流时, 土中孔压分布和地下结构浮力与静水压力不符; 均质土中竖向渗流时, 孔压和浮力较同深度理论值的提升比例与竖向水力梯度成正比; 承压水在上覆弱透水层中渗流时, 弱透水层中孔压和浮力的提升比例要大于强透水层, 且土分层界面处孔压和浮力的提升比例最大, 约为2倍的水力梯度。

关键词: 地下结构; 承压水; 渗流; 浮力; 孔隙压力

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)04-0769-06

作者简介: 木林隆(1984-), 男, 副教授, 主要从事深基础与地下工程开挖方面的研究工作。E-mail: mulinlong@hotmail.com。

Experimental study on influences of leakage of confined water on buoyancy of underground structures

MU Lin-long^{1,2}, WANG Le^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}, HE Yan-cheng^{1,2}, KANG Jing-wen³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Southwest Geotechnical

Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the prediction of the buoyancy of underground structures in confined aquifer is inaccurate, a series of model tests on the impact of confined aquifer seepage on the buoyancy of underground structures are conducted. Two cases are studied: (1) the vertical seepage in homogeneous soil layer; (2) the vertical seepage of the confined water through overlying aquiclude. The influences of the seepage on the buoyancy of the underground structure under different hydraulic gradients in both cases are investigated. The results show that the pore pressure distribution and the buoyancy of the underground structures are not consistent with those obtained from hydrostatic pressure when the seepage occurs. And they are usually larger than those obtained from hydrostatic pressure. The raising ratio of the pore pressure and buoyancy to the theoretical value based on hydrostatic pressure equals to the vertical hydraulic gradient in case the vertical seepage occurs in homogeneous soil. The raising ratio of the pore pressure and buoyancy to the theoretical value based on hydrostatic pressure is much larger than the hydraulic gradient in case the confined water seeps in the overlying aquiclude, which is obviously different from that in homogenous soil. In the case herein, the raising ratio is about 2 times the hydraulic gradient.

Key words: underground structure; confined water; seepage; buoyancy; pore pressure

0 引 言

随着中国经济快速发展, 城市建设大幅度延伸至地下空间, 其中地下结构抗浮设计一直是地下工程中关注的热点问题。国内外已有许多学者对地下结构的浮力作用机理展开了研究: 无渗流情况时, 地下结构所受浮力可按静水压力来计算^[1-3], 同时也可根据土层性质予以一定比例折减^[4-7]; 考虑渗流时, 渗流过程中

产生的渗透力诱发水土压力的变化^[8-11], 导致地下结构所受浮力与按静水压力计算所得浮力间存在一定差异^[12-14]。地下水渗流可以分为水平方向和竖直方向, 其中以竖直方向的渗流对地下结构浮力的影响尤为显著^[15], 特别是承压水向上越流渗流对地下结构浮力

影响^[4, 16-17]。而由于层间越流渗流受地下水赋存条件、动态变化等多因素的影响，目前越流渗流对浮力的影响的研究非常不成熟。现有的工程设计中应用简化计算模型与公式^[18-20]计算结果合理性不够，存在误差，往往造成地下结构上浮。因此有必要开展进一步研究工作明晰承压水越流对地下结构浮力影响的机理和规律。

本文针对承压水越流对地下结构浮力的影响问题，开展不同土层和水力梯度条件下竖向渗流对地下结构浮力影响模型试验，研究在竖向渗流作用下地下结构底板处孔隙压力、浮力与对应水力梯度间的关系。

1 试验设备

试验设备主要包含两大关键功能：一是实现对稳态竖向渗流场的模拟；二是实现浮力的单独测量。试验设备共由 4 部分组成，简图如图 1 所示，分别为模型箱、地下结构模型、供水循环系统和测量系统。

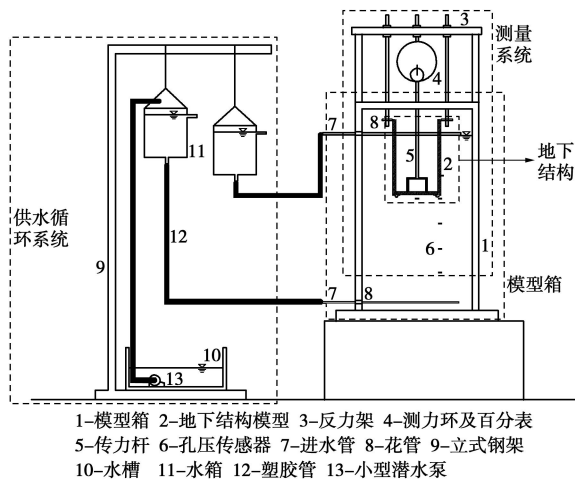


图 1 试验整体设计简图
Fig. 1 Schematic illustration of model test

1.1 模型箱

模型箱如图 2 所示，内部平面尺寸为 600 mm×600 mm，箱体内净高度 1000 mm。一块侧板上设置有两个用于控制渗流场上下游水位的进水口，其中上方进水口距箱体上缘 120 mm，下方进水口距箱体下缘 80 mm。

1.2 地下结构模型

地下结构模型如图 3 所示，整体呈长方体，外边缘水平尺寸 200 mm×200 mm，外侧高度 400 mm，采用 10 mm 厚塑料板拼接而成。结构底板与侧壁设置为相分离的模型结构，底板与侧壁由防水橡胶层配合金属压条将两者连接，形成了在一定幅度范围内可上下活动的底板构造。故结构底板在受浮力作用时相对侧壁可自由活动，结构侧壁摩阻力的影响被消除了；同

时，由于底板在向上运动时受到传力杆及橡胶层所提供的向下阻力，底板的位移量非常小，因而由于底板下方土体中负超静孔压所产生的吸附力也可以忽略不计。因此底板上所测力仅为浮力。



图 2 模型箱设计图
Fig. 2 Design of model box

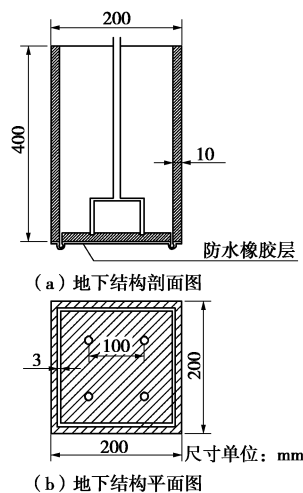


图 3 地下结构模型
Fig. 3 Model of underground structure

1.3 供水循环系统

由高度约 1.5 m 的立式钢架，分别控制模型箱顶部与底部总水头大小的两个悬挂式水箱，承接循环过程中溢出水的水槽，将水槽中的储水抽入高处水箱的小型潜水泵以及数根塑胶管组成。潜水泵功率 10 W，适用输入频率 50 Hz，最大流量 1800 L/h (500 mL/s)，最大扬程 2.2 m。

1.4 测量系统

测量浮力的力学测量系统由固定于模型箱的反力架，量程为 0.6 kN 的测力环，量程为 5 mm 的百分表及带支脚的传力杆组成。监测模型周边孔隙水压的量测系统为微型孔压传感器，量程为 20 kPa，精度为 40 Pa。孔压传感器布置如图 4 所示，其中传感器 a 用于监测结构底板中心孔压值，传感器 b、c、d、e、f 分别监测结构角部位置在埋深 20，30，40，50，60 cm

处的孔压值。并采用 dataTaker DT85 采集器记录数据。

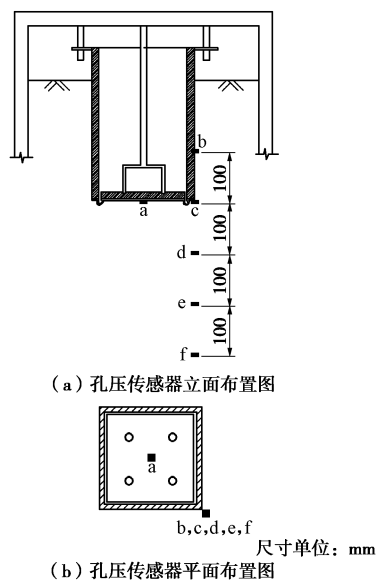


图 4 孔压传感器布置图

Fig. 4 Layout of pore pressure sensors

1.5 土体

试验中的土样均取自上海地区, 包括经筛分的砂土、黏质粉土, 试验时分层均匀铺设。铺设完成后、试验前取样, 土样的物理特性指标如表 1 所示。

表 1 试验土样物理特性指标

Table 1 Physical properties of soil samples in tests						
土样类别	湿密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	渗透系数 $(k \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$
细砂	1.96	1.63	0.64	—	—	5.35×10^{-5}
黏质粉土	2.01	1.71	0.65	8.8	0.38	7.11×10^{-7}

2 试验工况

本试验设计了 3 组试验, 共 7 个工况, 如表 2 所示。试验过程中, 通过提高连接模型箱底部的水箱高度, 使两个水箱之间的水头差达到指定工况的预设值。

试验组①是力学测量系统标定试验, 包含一个工况 (工况 0), 利用经典水浮力的原理, 将地下室模型悬置于纯水中, 通过调节水位高低改变模型底板所受浮力, 根据量测系统读数的相应变化进行系统标定。

试验组②, 模型箱内铺设 800 mm 厚细砂, 主要用于分析不同水力梯度条件下地下结构在均质细砂中所受水浮力与静水浮力的差异, 包含 3 个工况 (工况 1-1、1-2 和 1-3), 对应水力梯度分别为 0、0.125 和 0.25。

试验组③, 模拟承压水越流条件下地下结构浮力的变化。即将地下结构埋置于分层土中, 底面与土层

分界面齐平, 分层地层总体布置为上层为 400 mm 厚相对弱透水黏质粉土层, 下层为 400 mm 厚强透水细砂层, 采用筛雨法填土, 并分层碾压, 在细砂层填好后, 整平表面, 加结构, 继续筛填粉质黏土。包含 3 个工况 (工况 2-1、2-2 和 2-3), 对应水力梯度分别为 0, 0.125 和 0.25。

表 2 试验工况一览表

Table 2 Conditions in model tests		
试验分组	工况编号	工况说明
试验组①	工况 0	置于纯水中, 进行系统标定
	工况 1-1	置于细砂层中, 水头差 0
试验组②	工况 1-2	置于细砂层中, 水头差 10 cm
	工况 1-3	置于细砂层中, 水头差 20 cm
试验组③	工况 2-1	置于分层土中, 水头差 0
	工况 2-2	置于分层土中, 水头差 10 cm
	工况 2-3	置于分层土中, 水头差 20 cm

3 试验结果

3.1 力学测量系统标定

标定过程包含了两次水位升一降的完整循环, 标定结果如图 5 所示。可以看出, 除了水位第一次上升的过程, 之后的 3 次的水位单程升降曲线均基本重合。这表明系统在经历第一次加载的过程中已经将各机构组件之间的初始缝隙磨合完成, 之后则进入了较为规律的近似弹性状态。采用一次函数直线段对标定曲线的重合部分进行拟合, 其方程为

$$y = 20x - 22 \quad (1)$$

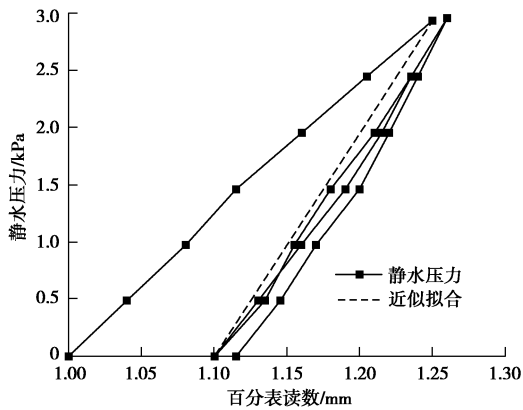


图 5 力学测量系统力学标定结果

Fig. 5 Calibration results of mechanical measurement system

3.2 均质土中竖向渗流试验

不同工况下结构角点位置不同深度处孔压传感器 (编号: b~f) 的测量结果如图 6 (a) 所示, 实测值相对理论静水孔压的提升比例 $(P/P_0 - 1)$ 绘制于图 6 (b) 中。由图 6 (a) 可见, 静水工况 1-1 的孔压量测结果与理论静水孔压值曲线基本吻合, 而施加了竖

表 3 第一组工况底板中心孔压与浮力实测值

Table 3 Values of pore pressure and buoyancy of structural center in test condition No. 1

工况	总水力 梯度	底板中心孔压实 测值 P_c /kPa	底板中心理论静水 孔压值 P_0 /kPa	孔压提升比例 $\frac{P_c - P_0}{P_0}$	百分表读数 /mm	底板浮力实测 值 F /N	底板理论静水 浮力值 F_0 /N	浮力提升比 例 $\frac{F - F_0}{F_0}$
1-1	0	3.105		0.035	1.260	128		0.067
1-2	0.125	3.509	3.0	0.170	1.280	144	120	0.200
1-3	0.25	4.101		0.367	1.305	164		0.367

表 4 第二组工况底板中心孔压与浮力实测值

Table 4 Values of pore pressure and buoyancy of structural center in test condition No. 2

工况	总水力 梯度	底板中心孔压实 测值 P_c /kPa	底板中心理论静水 孔压值 P_0 /kPa	孔压提升比例 $\frac{P_c - P_0}{P_0}$	百分表读数 /mm	底板浮力实测 值 F /N	底板理论静水 浮力值 F_0 /N	浮力提升比 例 $\frac{F - F_0}{F_0}$
2-1	0	2.945		-0.018	1.260	128		0.067
2-2	0.125	3.724	3.0	0.241	1.290	152	120	0.267
2-3	0.25	4.640		0.547	1.320	180		0.500

向渗流场的工况 1-2、1-3 的孔压曲线仍大致呈直线，但其数值明显大于工况 1-1。由图 6（b）可见，各工况中各测点孔压值相对于理论静水孔压值的提升比例大致呈常数，波动幅度均在 0.05 以内；工况 1-2 的提升比例约 0.14，工况 1-3 的提升比例约 0.29。均质土中的孔压值较同一深度处理论静水孔压值的提升比例与竖向水力梯度基本一致。可见，对于该条件下结构物的浮力应当以水力连通区域最高水头高度来进行计算，而非结构物处水头高度。

结构底板中心点处孔压传感器 a 的测量值，结构底板所受上浮力测量值，以及两者在静水情况下的理论值见表 3。其中底板浮力实测值与百分表读数间的换算关系由纯水中的标定结果确定。

由表 3 表明，各工况底板中心孔压 P_c 相对于理论静水孔压 P_0 的提升比例与总水力梯度大致成正比；对比图 6（b）可见，该提升比例普遍大于相同工况中结构角点位置各测点的提升比例，也即表示在竖向渗流场中，结构底板中心相对结构角点位置有着更大的孔压提升比例。同时，由实测浮力值相对理论静水浮力的提升比例可以看到，该提升比例与总水力梯度同样大致成正比，当显然大于水力梯度值，且与中心孔压的提升比例相近。

3.3 分层土中竖向渗流试验

该试验不同工况下结构角点位置不同深度处孔压传感器（编号：b~f）的测量值如图 7（a）所示；上孔压传感器的测量值相对于理论静水孔压的提升比例（ P/P_0-1 ）如图 7（b）所示。由图 7（a）可见，静水工况 2-1 的孔压量测结果与理论静水孔压值曲线基本吻合，而施加了竖向渗流场的工况 2-2、2-3 的孔压量测值明显大于工况 2-1。此外，不同于均质土中情况，工况 2-2 与工况 2-3 的孔压曲线呈折线型，在埋深较浅时斜率较大，在埋深较深时斜率较小，其拐点位于埋深 0.4 m 处，即土层分界面位置。由图 7（b）可见，工况 2-2、2-3 的提升比例在 0.4 m 深度范围内保持稳定或稍有增加，而在 0.4 m 深度以下则呈明显下降。在孔压提升比例最大位置在土层分界面处：工况 2-2 的提升比例约为 0.23，工况 2-3 的提升比例约为 0.52，均约为 2 倍的水力梯度。渗流在上覆弱透水层中提升的孔压要大于均质透水层，并不符合静水提高比例，

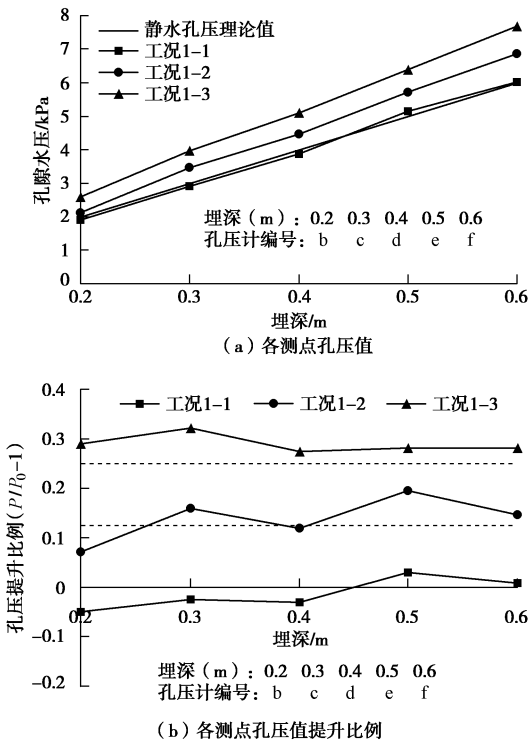


图 6 结构角点位置不同深度测点孔压值

Fig. 6 Values of pore pressure at different depths in structural corner position

可知对于承压水中地下结构按静水压力设计偏危险。

结构底板中心点处孔压传感器 a 的测量值, 结构底板所受浮力测量值, 以及两者在静水情况下的理论值见表 4。

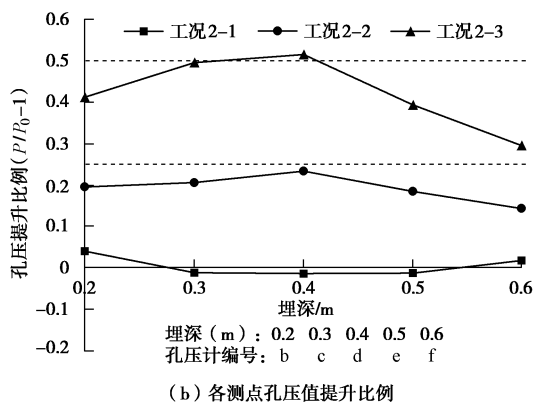
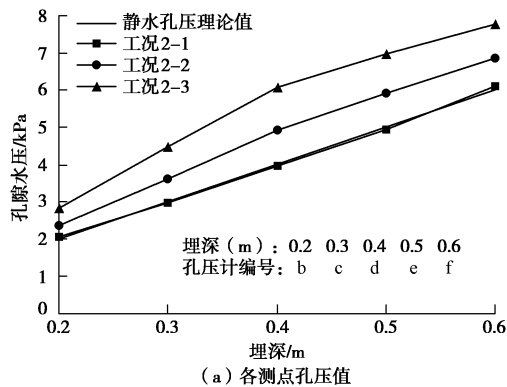


图7 结构角点位置不同深度测点孔压值

Fig. 7 Values of pore pressure at different depths in structural corner position

由表 4 表明, 各工况底板中心孔压 P_c 相对于理论静水孔压 P_0 的提升比例大致为总水力梯度的 2 倍, 且略大于图 7 (b) 中同深度 (30 cm) 处结构角点位置测点的孔压提升比例。同时, 实测浮力值相对理论静水浮力的提升比例与中心孔压的提升比例相近, 即同样大致等于总水力梯度的 2 倍。以上两项的结果相较第二组工况均有明显提升, 即当结构处于分层土的弱透水层中时, 在自下而上的竖向渗流场中的底板中心孔压与底板所受浮力变化幅度最大, 对比 3.2 节均质土层中的渗流情况, 由于上层弱透水层起到隔水顶板的作用, 存在承压水越流时, 在透水层中的底板浮力较均质土情况均有明显提升, 此处可达 2 倍。

4 结 论

本文应用模型试验, 研究因承压水层存在, 竖向越流渗流对地下结构附近孔隙压力和结构所受浮力的影响。主要试验结论如下所述:

(1) 存在向上的竖向渗流时, 孔压分布和地下结构浮力均明显大于静止水压力状态下的孔压及浮力。

(2) 均质透水土层中孔压及浮力提升与竖向水力梯度基本一致, 浮力计算应当采用水力连通区域最高水位进行计算。

(3) 上覆弱透水层的土层中, 承压水越流, 底板埋深不同时采用不同系数计算浮力提高, 分层界面处孔压和浮力的提升比例最大, 均约为 2 倍的水力梯度。

由此可见, 地下结构位于均匀透土层及承压水地层中应当考虑不同的计算方法, 可采用比例系数进行简化分析, 比例系数可采用更多的试验结果进行拟合。本研究中, 底板位于分层界面处时, 地下结构浮力的提高可达到 2 倍的水力梯度。

参考文献:

- [1] 崔 岩, 崔京浩, 吴世红. 地下结构浮力模型试验研究[J]. 特种结构, 1999, 16(1): 32 - 39. (CUI Yan, CUI Jing-hao, WU Shi-hong. Model test study of buoyancy on underground structure[J]. Special Structures, 1999, 16(1): 32 - 39. (in Chinese))
- [2] 崔红军, 陆士强. 基坑围护结构承受的水压力计算理论的试验验证和分析[J]. 武汉大学学报, 2001, 34(1): 45 - 48. (CUI Hong-jun, LU Shi-qiang. Test verification and analysis of calculation theory of water pressure on bracing construction of foundation pit[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2001, 34(1): 45 - 48. (in Chinese))
- [3] VERRUIJT A. Soil mechanics[M]. Delft: Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, 2006.
- [4] 周朋飞. 城市复杂环境下地下水浮力作用机理试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006. (ZHOU Peng-fei. Groundwater uplift mechanism under complex urban environment[D]. Beijing: China Geologic University, 2006. (in Chinese))
- [5] 方玉树. 基于水压率讨论土中孔隙水压力及有关问题[J]. 岩土工程界, 2007, 10(5): 21 - 26. (FANG Yu-shu. Discussion on pore pressure and related problems considering hydraulic pressure ratio[J]. Geotechnical Engineering World, 2007, 10(5): 21 - 26. (in Chinese))
- [6] 梅国雄, 宋林辉, 宰金珉. 地下水浮力折减试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1476 - 1480. (MEI Guo-xiong, Song Lin-hui, ZAI jin-ming. Experimental study on reduction of groundwater buoyancy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1476 - 1480. (in Chinese))
- [7] SONG L H, KANG X, MEI G X. Buoyancy force on shallow

- foundations in clayey soil: an experimental investigation based on the "half interval search"[J]. *Ocean Engineering*, 2017, **129**: 637 - 641.
- [8] 章胜南. 成层土中围护结构所受水土压力的计算[J]. *岩土工程学报*, 1998, **20**(4): 98 - 100. (ZHANG Sheng-nan. Water and earth pressures acting on retaining structure in layered soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, **20**(4): 98 - 100. (in Chinese))
- [9] RICE J D. A study on the long-term performance of seepage barriers in dams[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [10] RICE J D, DUNCAN J M. Findings of case histories on the long-term performance of seepage barriers in dams[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **136**(1): 2 - 15.
- [11] 张在明, 沈小克, 周宏磊, 等. 国家大剧院工程中的几个岩土工程问题[J]. *土木工程学报*, 2009, **42**(1): 60 - 65. (ZHANG Zai-ming, SHEN Xiao-ke, ZHOU Hong-lei, et al. Geotechnical aspects of the National Centre for the Performing Arts[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, **42**(1): 60 - 65. (in Chinese))
- [12] 孙保卫, 徐宏声. 孔隙水压力测试与建筑抗浮水压力的确定[J]. *工程勘察*, 1998(3): 31 - 35. (SUN Bao-wei, XUN hong-sheng. Pore water pressure test and determination of antifloat water pressure[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 1998(3): 31 - 35. (in Chinese))
- [13] 李广信, 吴剑敏. 浮力计算与黏土中的有效应力原理[J]. *岩土工程技术*, 2003(2): 63 - 66. (LI Guang-xin, WU Jian-min. Calculation of uplift pressure on underground construction and effective stress principle in clay[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2003(2): 63 - 66. (in Chinese))
- [14] 曹依雯, 黄润秋, 沈水龙, 等. 基桩对含水层渗流阻挡作用效应研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(6): 1617 - 1622. (CAO Yi-wen, HUANG Run-qiu, SHEN Shui-long, et al. Investigation of blocking effect on groundwater seepage of piles in aquifer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(6): 1617 - 1622. (in Chinese))
- [15] 郑伟龙. 北京地区地下结构上的浮力作用机理试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005. (ZHEGN Wei-long. Experimental study on action mechanism of uplift on the underground structure in Beijing[D]. Beijing: China Geologic University, 2005. (in Chinese))
- [16] 张竹庭. 地下水渗流对地下结构抗浮计算的影响分析[J]. *建筑施工*, 2012, **34**(8): 780 - 782. (ZHANG Zhu-ting. Impact analysis of underground water seepage upon anti-floating calculation of underground structure[J]. *Building Construction*, 2012, **34**(8): 780 - 782. (in Chinese))
- [17] 熊欢. 地下结构抗浮设计中浮力的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (XIONG Huan. Research on buoyancy in anti-floating design of underground structures[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))
- [18] 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 - 15. (ZHANG Xin-hai. Analysis of defence water level and reduction factor of buoyancy for underground buildings in Shenzhen area[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2004(2): 12 - 15. (in Chinese))
- [19] 李镜培, 孙文杰. 地下结构的浮力计算与抗拔桩设计方法研究[J]. *结构工程师*, 2007, **23**(2): 80 - 84. (LI Jing-pei, SUN Wen-jie. Study on design of uplift piles and calculation of float in underground structures[J]. *Structural Engineers*, 2007, **23**(2): 80 - 84. (in Chinese))
- [20] 李超. 建筑抗浮设计水位的合理取值[J]. *工程勘察*, 2014, **42**(4): 49 - 54. (LI Chao. Reasonable value of water level for building anti-floating design[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2014, **42**(4): 49 - 54. (in Chinese))