

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.12

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

荣雪宁¹, 徐日庆^{2,3}, 冯苏阳^{2,3}, 朱亦弘^{2,3}, 伍璇⁴

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 浙江大学滨海和城市
岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室,
浙江 杭州 310058; 4. 武汉市昌厦基础工程有限责任公司, 湖北 武汉 430022)

摘要: 饱和黏土中的长期浮力是否需要折减是一个具有争议的问题。为研究饱和黏土中的长期浮力是否小于相同水头高度下的静水压力, 通过地基上浮失稳的模型试验, 实测了上浮极限状态下(即有效应力约等于 0 时)饱和砂土和黏土中的浮力折减系数。实验装置由模型槽、土样、凡士林、浮筒、配重及压重设施组成, 通过浮筒上浮瞬间的受力平衡得到失稳时的实际上浮力。实验测得饱和砂土中的浮力折减系数为 1, 饱和高岭土和饱和蒙脱石中的浮力折减系数分别为 0.973 ± 0.024 和 0.959 ± 0.016 。试验结果表明上浮极限状态下, 饱和土中的浮力与纯水中的浮力差别很小。即便在高塑性黏土中, 模型基础失稳时受到的上浮力与纯水中的浮力相比, 仅折减了不到 5%。基于饱和土有效应力原理的分析表明, 上浮极限状态下的浮力折减系数与土样固结前的 Skempton B 值互为倒数。大量实测数据并未发现饱和黏土的 Skempton B 值明显大于 1, 故饱和黏土的浮力折减系数也不可能显著小于 1。本文模型试验和理论分析表明, 在地基抗浮承载力验算时, 饱和黏土中的长期浮力不宜进行显著折减。

关键词: 饱和土; 浮力; 折减系数; 模型试验; Skempton B 值; 孔隙水压力

中图分类号: TU411.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0090-07

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

RONG Xuening¹, XU Riqing^{2,3}, FENG Suyang^{2,3}, ZHU Yihong^{2,3}, WU Xuan⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;
2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058,
China; 3. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 4. Wuhan Changxia Foundation Engineering Co., LTD,
Wuhan, Hubei 430022, China)

Abstract: Whether the long-term buoyancy in saturated clay is less than that in pure water is still a controversial issue. The theoretical analysis of this issue is lacked and the existing experimental researches lead to inconsistent opinions. A model test of up-lifting is conducted in both the cohesionless and cohesive saturated soils, and the reduction coefficient of buoyancy is obtained during the ultimate limit state of up-lifting (ULSU, i. e., the effective stress approaches zero). The experiment is based on geometry measurements, thus the inaccuracy of force measurement is avoid. The results indicate that the reduction coefficient of buoyancy is close to unity for different saturated soils. The uplift force in the saturated soil is approximately the same as that in pure water, and no significant reduction is observed. For the saturated soils, theoretical

收稿日期: 2018-11-05; 修订日期: 2019-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41672264); 中国博士后科学基金资助(2018M640488)

第一作者: 荣雪宁(1988-), 男, 博士, 主要从事土力学基本理论和土、水与结构相互作用等方面的研究。E-mail: rxn@zju.edu.cn

通讯作者: 徐日庆(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事多尺度土力学基本理论等方面的研究。E-mail: xurq@zju.edu.cn

analyses based on the effective stress principle show that the reduction coefficient of buoyancy during the ULSU is the reciprocal of the Skempton's B value before consolidation. However, the B -value significantly greater than unity is not observed for the varied saturated clays. Therefore, during the ULSU in the saturated soils, significant reduction in buoyancy is not supported by the experimental and theoretical results.

Keywords: saturated soil; uplift force; reduction coefficient; model test; Skempton's B value; pore pressure

学术界就饱和黏土中的长期浮力是否需要折减一直存在争议。理论上地下结构受到的水浮力与阿基米德浮力相同^[1],然而一些国内外规范却允许对低渗透性土体中的浮力进行折减^[2-5]。多名学者也用不同方法实测了浮力折减系数,得出的结论不尽相同^[6-12]。梅国雄等^[7-8,10]通过一系列实验测量了饱和黏土和砂土中的浮力折减系数,得到黏土中的浮力折减系数约为0.7,砂土无显著折减(约0.95)。崔岩等^[6,11]、向科等^[9]的实验则得出了不同的结论,认为饱和黏土和砂土中浮力均无显著折减。倪伟杰等^[12]测量了饱和软黏土中的管道上浮力,认为饱和软土中的浮力折减系数与填土的抗剪强度有关,在饱和土强度很低时大于1(此时填土呈泥浆状,密度比纯水大),强度较高时则小于1。总的说来饱和土浮力的理论研究还不完善,实测结论也很不一致。故《岩土工程勘察规范》认为黏土中基础受到的浮力往往小于水头高度,然而该问题缺乏理论依据,只有掌握实测数据时才能进行一定折减^[13]。

目前饱和土的浮力试验主要分为两大类,一类通过埋置的孔压计测量孔压,通过孔压计算浮力;另一类则不使用孔压计,直接通过上浮体的受力平衡分析计算浮力。通过实验室或现场埋置孔压计^[8,14],前一类试验常常得出黏土中孔隙水压力本身就折减了,进而浮力也相应折减的结论。然而根据连通器原理,只要黏土不是完全隔水的,稳定后的土中孔压就不应折减,否则将违背最小势能原理。崔岩等^[6]的试验也表明饱和黏土中的水头高度并无折减,连通器原理仍然成立。实际观测到的孔压折减现象可能是由于黏土渗透性较差,在有限的试验和现场测量时间内,孔压升高缓慢导致的。因此,采用孔压计的浮力试验只能用作施工监测的手段,可作为选择施工方法和时机的依据,但是不能根据短期的孔压测量设计永久性的工程构造。另一方面,实际上浮力等于孔压乘以其在基础底面的作用面积。尽管长期看来孔压大小不会折减,孔压作用面积却可能折减。综上所述,测量孔隙水压力的并不是研究土中长期浮力的合理方法:测得的孔压

折减并不表明长期浮力有所折减;如果测得的孔压没有折减,由于无法证明基础底面受到的上浮力等于孔压^[9],也就无法证明上浮力并未折减。此外,通过埋设孔压计等方法只能测得非临界状态下的孔压,对上浮临界状态下的浮力折减问题依然难以判断。

第二类浮力试验往往通过使饱和土中的模型基础达到上浮临界状态,直接根据上浮体的受力平衡计算上浮力。在最理想的情况下,上浮力等于上浮体重力。理论上该方法比测量孔压更加合理,能测量到真实的上浮力。然而文献中通过上浮体受力分析得到的浮力折减系数也不一致。有的试验结果表明上浮临界状态下,饱和黏土中浮力折减系数约为70%^[7-8]。有的试验结果则表明该临界状态下饱和黏土中的浮力与纯水中的浮力相同,并无折减^[9]。实际操作中,即使是模型试验,上浮体的受力分析也往往比较复杂。上浮模型试验一般可分为两种,一种将模型基础埋置于土中,另一种直接将模型基础放置于土表面。如果模型基础埋置于土中,浮力测量就受到摩擦力的影响。而摩擦力受填土操作影响较大,很难保证每次上浮试验时的侧摩擦力都是一样的。如果模型基础只是简单放置于土表面,没有基础埋深,虽然可以避免侧摩擦力的影响,却难以保证基础底面和土的表面密切贴合。如果基础底面和地基土表面之间稍有缝隙,则显然实际测得的就是纯水中的浮力。这些边界条件的细微差别可能导致了不同文献得到的浮力折减系数不相一致。为此,本次研究进行了一种边界条件简单、易于分析的上浮试验。试验中尽量排除了侧摩擦力和基底缝隙的影响,以测量基础上浮临界状态下的真实浮力,并从理论上分析了上浮临界状态下饱和土的浮力是否应该折减。本文将只讨论孔压稳定后的长期浮力。

1 饱和土上浮试验装置及试验步骤

本次浮力试验装置如图1所示。一般认为浮力折减问题可能与土颗粒结合水的能力有关。在3种主要黏土矿物(高岭石、伊利石和蒙脱石)中,结合水能力

最弱的是高岭石矿物,结合水能力最强的是蒙脱石^[15]。砂土则不具有结合水的能力。故本次研究共选用了3种土材料:(1)粒径为0.25~0.5 mm的海砂(中砂);(2)过筛1000目的高岭土;(3)过筛1500目的蒙脱石。对于每种材料,实验步骤简述如下:

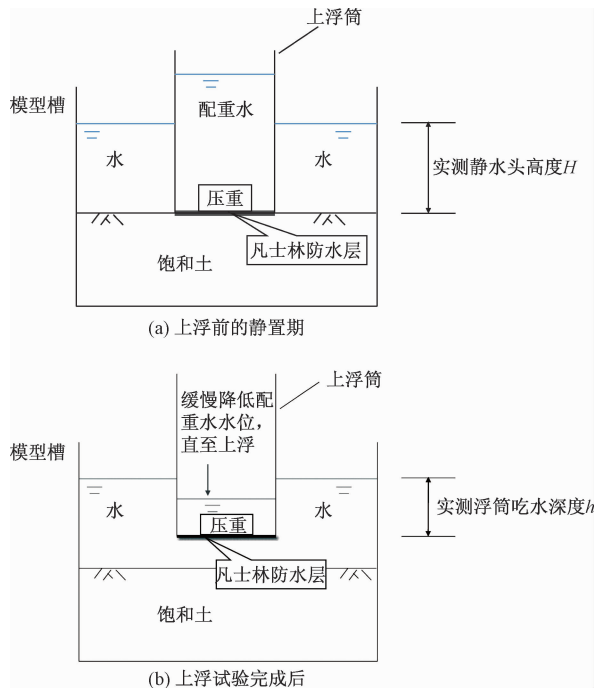


图1 饱和土上浮试验装置

Fig.1 Schematic diagram of the model tests

(1)将试验用土填筑在模型槽中(图1a)。采用一个圆柱形的上浮筒作为模型基础(外径9 cm,高45 cm,由于后续受力分析中模型基础的底面积自动消去,浮筒的外径是无关紧要的)。为使该浮筒上浮后仍保持垂直,筒中安装了配重。在浮筒底面涂抹一层较厚的凡士林防水层,安置于土表面。稍稍下压浮筒,使凡士林涂层产生塑性变形(土的表面不产生变形),填满基础底面和土表面之间的缝隙。同步缓慢上升模型槽和浮筒中的水位,直至模型槽中的水位达到实测静水头高度 H 。使装置保持图1a所示状态静置,注意补偿蒸发掉的水量使水头高度 H 始终保持不变。静置15 d后,土样饱和,且土中的孔隙水压力已经稳定,开始上浮试验(为达到研究目的,只需要土样表层饱和,孔隙水的最大渗径只有约4.5 cm。平行试验表明静置15 d和静置1个月后的上浮体吃水深度基本相同,故选择15 d作为装样后的静置期)。

(2)用注射器缓慢抽出浮筒中的配重水,使上浮体重量缓慢而连续减小,直至浮筒浮起。一旦浮

筒开始位移,底面的黏聚力就显著减小,凡士林涂层和饱和土表面之间整齐脱开,故上浮失稳是突然发生的。由于抽水非常缓慢,可认为上浮前后瞬间筒中水的重量相同。测量上浮后的吃水深度 h (图1b)。

(3)重复装样-静置-上浮的步骤,在不同的静水头高度 H 下多次试验。

2 受力分析及数据处理方法

在上浮失稳前的瞬间,上浮体的受力分析如图2所示。图中 G 表示上浮体所受重力(包括浮筒、压重、配重水和浮筒底部的凡士林涂层); c 表示凡士林涂层和黏土表面之间的黏聚力; u 为饱和土表面处的孔压;上浮极限状态下的浮力折减系数记为 η_0 。记浮筒的底面积为 A (后续计算中消去),则上浮前瞬间的竖向力平衡分析有:

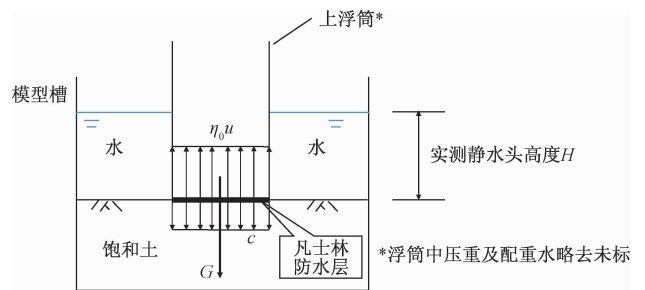


图2 上浮失稳前瞬间上浮体竖向受力分析

Fig.2 Equilibrium analysis during the ultimate limit state of up-lifting

$$G + cA = \eta_0 uA \quad (1)$$

而由液体压强公式有:

$$u = \gamma_w H \quad (2)$$

式中: γ_w ——水的重度(后续计算 η_0 时消去);

H ——装置静置期间一直保持的水头高度。

将式(2)代入式(1)有:

$$G + cA = \eta_0 \gamma_w HA \quad (3)$$

浮筒上浮稳定后的受力分析如图3所示,此时的竖向力平衡为:

$$G = u_1 A \quad (4)$$

其中 u_1 由吃水深度 h 决定,即:

$$u_1 = \gamma_w h \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),再将得到的重力 G 表达式代入式(3),有:

$$\gamma_w hA + cA = \eta_0 \gamma_w HA \quad (6)$$

将式(6)稍作整理,得:

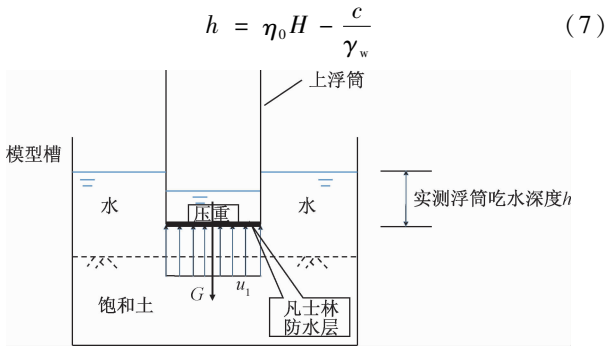


图 3 浮筒浮起后的竖向受力分析
Fig. 3 Equilibrium analysis after uplift failure

由于 c 表示凡士林和土之间的最大黏聚力(即抗拉强度),是一个与水压无关的常量,从式(7)可以看出上浮体吃水深度 h 和水头高度 H 呈线性关系。以 H 为横坐标, h 为纵坐标,用每次上浮试验测得的数据作图,其斜率即为上浮临界状态下的浮力折减系数 η_0 。该试验仅需测量 2 个长度参数,边界条件清晰简明,最大限度地避免了使用测力仪器导致的误差。计算 η_0 时甚至无需得知实验用水的重度。

3 饱和砂土的上浮试验

首先采用粒径为 0.25 ~ 0.5 mm、洁净无杂质的海砂进行上述实验。由于饱和砂土内部黏聚力为零,试验中发现上浮体并未从凡士林与砂土的接触面上断裂,而是在砂土内部断裂了。而且砂土地基中并未发生突然的上浮失稳。随着压重水的减少,上浮体黏连着一薄层表面砂土逐渐脱离了下部砂土。说明对饱和砂土地基,上浮体吃水深度和静水头高度是相等的,即 $h = H$ 严格成立。故上浮极限状态下,饱和砂土中的浮力和纯水中浮力相同, $\eta_0 = 1$ 。

4 饱和高岭土上浮试验

采用产自江西景德镇的高岭土,过 1 000 目筛(粒径小于 13 μm)。土样饱和后的基本物理参数为:含水量 $w = 30.41\%$,密度 $\rho = 1.93 \text{ g/cm}^3$,土粒比重 $G_s = 2.69$,孔隙比 $e = 0.818$ 。对于饱和高岭土和蒙脱石,试验中均观察到了突发性的上浮失稳:凡士林防水层突然整体脱离饱和土表面,浮筒上浮后的吃水深度显著小于静水头高度。这表明试验的防水措施是成功的,上浮失稳前浮筒底面和土的表面之间并没有进水。对于饱和高岭土,共进行了 6 次不同静水头高度下的上浮试验,试验结果如图 4 所示。从图 4 所作线性回归曲线可以看出,高岭土上浮试验的 $h - H$ 图斜率为

0.973,标准差为 0.024。可见在上浮临界状态下,饱和高岭土中的浮力与纯水中的浮力基本相同,没有显著折减。

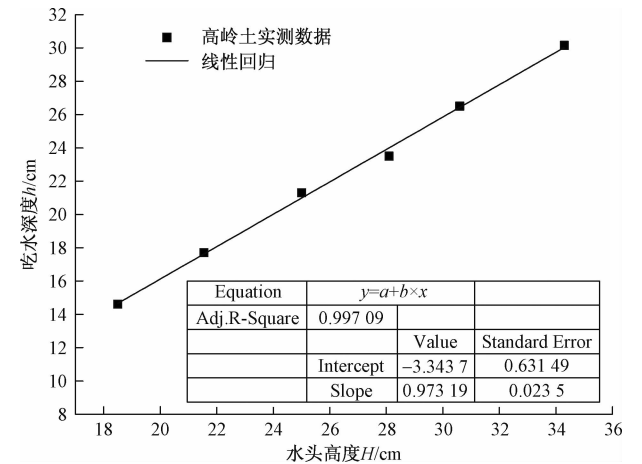


图 4 饱和高岭土上浮试验结果
Fig. 4 Results of the uplift test for the saturated kaolinite clay

5 饱和蒙脱石上浮实验

采用产自河南信阳的蒙脱石,过 1 500 目筛(粒径小于 9 μm)。土样饱和后的基本物理参数为:含水量 $w = 40.18\%$,密度 $\rho = 1.78 \text{ g/cm}^3$,土粒比重 $G_s = 2.59$,孔隙比 $e = 1.04$ 。共进行了 7 次不同静水头高度下的上浮试验,试验结果如图 5 所示。从图 5 所作线性回归曲线可以看出,蒙脱石上浮试验的 $h - H$ 图斜率为 0.959,标准差为 0.016。可见在上浮临界状态下,饱和蒙脱石中的浮力也基本与纯水中的浮力相同,没有显著折减。

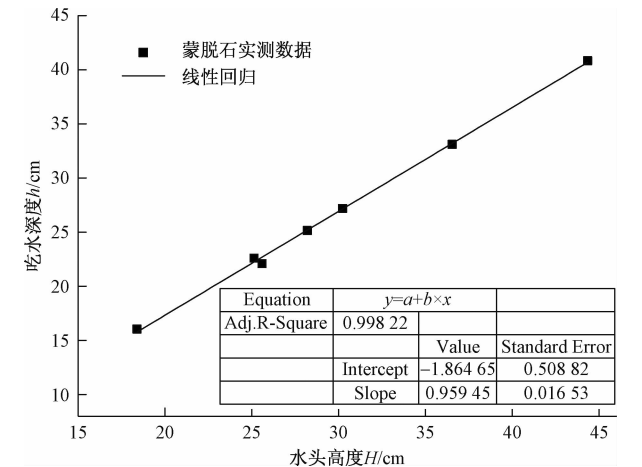


图 5 饱和蒙脱石上浮试验结果
Fig. 5 Results of the uplift test for the saturated montmorillonite clay

6 $\eta_0 \approx 1$ 的理论分析

不同文献都曾指出,浮力折减问题和饱和土的有效应力原理紧密相关^[1,16-17]。一般地下结构的抗浮极限承载力分析如图6所示^[18],可见该极限状态下基础趋于向上移动,甚至可以考虑侧壁的摩擦力作为抗浮力,故基底有效应力 σ' 为零。由作用力与反作用力定律可知,此时基础底面所受的上浮力就是饱和土层顶面的竖向总应力 σ 。如果土颗粒间的接触面积很小,可以忽略不计,则由 Terzaghi 有效应力公式可知(为方便讨论浮力问题,对常见的 Terzaghi 公式进行了移项):

$$\sigma = \sigma' + u \quad (8)$$

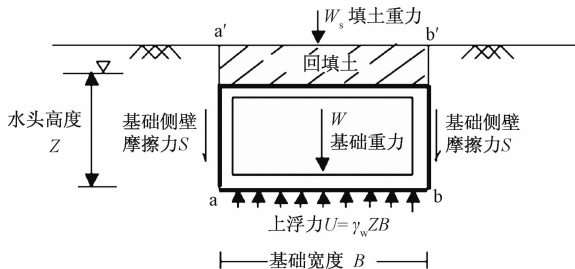


图6 地下结构抗浮极限承载力验算的受力分析^[18]

Fig.6 Equilibrium analysis during the ultimate limit state of up-lifting for the underground structure^[18]

由式(8)可知, $\sigma' = 0$ 时有 $\sigma = u$,即基底处的竖向总应力等于孔压,显然此时浮力折减系数等于1。式(8)的成立与饱和土浮力无需折减这两个命题是等价的。

如果土颗粒间的接触面积不可忽略,则孔隙水压力没有作用在整个截面上, Terzaghi 的有效应力原理需记为更加一般的形式^[19-20]:

$$\sigma = \sigma' + \eta u \quad (9)$$

其中 η 在文献[19]中被称为孔压因子(Fraction of pore pressure),是一个小于1的数(可能非常接近于1),一般认为其取值与颗粒接触面积有关^[20]。在有效应力不变时,由式(9)可知:

$$\Delta \sigma = \eta \Delta u \quad (10)$$

此时总应力增量仅为孔压增量的 η 倍。可见饱和土的浮力折减实际上是基于式(9)的有效应力原理,浮力折减系数就是式(9)中的孔压因子 η 。而已有研究表明孔压因子 η 是一个变量,随着有效应力的变化而改变^[19]。即使对于同一种土,也不存在固定的浮力折减系数。不过在基础的上浮临界状态下(图6),已知基底有效应力为0,此时的浮力折减系数即为 $\sigma' =$

0时的孔压因子 η_0 。因此前文中将上浮试验测得的浮力折减系数记为 η_0 。

了解浮力折减系数的原理后,通过理论分析也能得出 $\eta_0 \approx 1$ 的结论。在进行饱和土的三轴试验前,为确保试样饱和度,需要测量固结前土样的 Skempton's B 值,即在有效应力接近零的不排水条件下提高总应力,测量孔压增量和总应力增量的比值。有:

$$\text{Skempton's } B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad \sigma' \approx 0 \quad (11)$$

对于低压下的饱和土,可认为不排水条件下试样没有体积变化(纯水1 MPa 压力下的体积应变小于0.05%,土颗粒的压缩性则更低,大约只有纯水的1/25^[19])。而饱和土的变形是有效应力决定的,故可认为不排水条件下有效应力不变,此时式(10)和式(11)同时成立。故有效应力接近于零时,有:

$$\eta_0 = \frac{\Delta \sigma}{\Delta u} = \frac{1}{B} \quad (12)$$

可见 η_0 和固结前的 B 值互为倒数。由以上分析可知,饱和土的 Skempton B 值和上浮极限状态下的浮力折减系数是同一问题的两个侧面。如果上浮极限状态下的浮力折减系数显著小于1,比如有文献提到 η_0 小于0.8,则 B 值需大于1.25。显然大量三轴试验前的 B 值检测中从未观测到 B 值高达1.25。其部分原因是土样饱和度未达到100%。然而即使土样只有99%饱和(通过反压饱和很容易达到99%的饱和度^[21]),导致 B 值较饱和土偏低0.02~0.1^[22], η_0 小于0.8仍然要求实测 B 值超过1.1。这样高的 B 值同样从未观测到过。一般看来,饱和或近饱和土的实测 B 值都是等于或略小于1的^[22]。由于理论上 η_0 和固结前的 B 值互为倒数,上浮极限状态下的饱和土浮力也就不可能有显著折减。

应该指出的是,本文的模型试验和理论分析都是在有效应力为零的条件下进行的。真实地下结构或基础不可能放置于土的表面,而是深入土中,基础侧壁受到有效土压力和摩擦力。然而对于基础的底面,无论其位于土的表面或是深埋于土中,在抗浮验算时均可认为有效压应力为零(如果基底和土骨架间存在有效压应力,基础就肯定不会上浮失稳了)。因此基底抗浮验算时本文的结论是适用的。当有效应力显著大于零时,地下结构受到水的作用力是否等于孔隙水压力,则需要进一步研究讨论。

7 结论

(1) 饱和砂土地基中的上浮体吃水深度等于上浮

前静水头高度,表明饱和砂土中的浮力与纯水中的浮力相同,浮力折减系数等于1。

(2) 上浮极限状态下,饱和高岭土和饱和蒙脱石中的浮力折减系数实测值分别为 0.973 ± 0.024 和 0.959 ± 0.016 ,表明该极限状态下饱和黏土中的浮力与纯水中浮力差别很小。

(3) 针对饱和土的理论分析表明,上浮极限状态下的浮力折减系数与固结前的 Skempton B 值互为倒数。由于大量实测数据中并未发现饱和黏土的 B 值显著超过1,上浮极限状态下的浮力也就不可能有显著折减。

(4) 上浮极限承载力验算时,地下结构底面处的有效应力为零,无论土质和埋深如何,基底受到的长期浮力均不宜折减。

参考文献:

- [1] 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 G X, WU J M. Calculation of up-lift pressure on underground construction and effective stress principle in clay [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(2): 63-66. (in Chinese)]
- [2] DEWEY R R, REICH R W, SAOUMA V E. Uplift modeling for fracture mechanics analysis of concrete dams [J]. J Struct Eng, 1994, 120 (10): 3025-3044.
- [3] U S Department of the Interior. Design of gravity dams [R]. Washington, D C: Bureau of Reclamation, 1976.
- [4] FERC. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects [R]. Washington, D C: Office of Hydropower Licensing, 1991.
- [5] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 1994. [Editorial Committee of Handbook of Geotechnical Engineering. Handbook of Geotechnical Engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994. (in Chinese)]
- [6] 崔岩, 崔京浩, 吴世红, 等. 浅埋地下结构外水压折减系数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (1): 82-84. [CUI Y, CUI J H, WU S H, et al. Testing study of reduction factor for the pore water pressure of underground structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (1): 82-84. (in Chinese)]
- [7] 张乾, 宋林辉, 梅国雄. 黏土地基中的基础浮力模型试验 [J]. 工程勘察, 2011 (9): 37-41. [ZHANG Q, SONG L H, MEI G X. Model experiment on foundation buoyancy in clay [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011(9): 37-41. (in Chinese)]
- [8] 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 G X, SONG L H, ZAI J M. Experimental study on reduction of groundwater buoyancy [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (9): 1476-1480. (in Chinese)]
- [9] 向科, 周顺华, 詹超. 浅埋地下结构浮力模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38 (3): 346-357. [XIANG K, ZHOU S H, ZHAN C. Model test study of buoyancy on shallow underground structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38 (3): 346-357. (in Chinese)]
- [10] 宋林辉, 刘益, 梅国雄, 等. 黏土地基中的水浮力试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 80-84. [SONG L S, LIU Y, MEI G X, et al. Experimental study on buoyancy effect on deep foundation in clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 80-84. (in Chinese)]
- [11] 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 (1): 32-39. [CUI Y, CUI J H, WU S H. Model test of buoyancy of underground structure [J]. Special Structures, 1999 (1): 32-39. (in Chinese)]
- [12] 倪伟杰, 朱斌, 陈仁朋, 等. 回填软土中管道上浮力测试及计算方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (3): 569-573. [NI W J, ZHU B, CHEN R P, et al. Tests and methods for buoyancy of pipelines in backfill soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (3): 569-573. (in Chinese)]
- [13] 中华人民共和国建设部. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50021-2001 Code for investigation of geotechnical engineering [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)]
- [14] 高涛. 黏性土中地下水浮力探讨 [C] // 吉林省土木建筑学会 2014 年学术年会. 长春: 吉林省土木建筑学会, 2014: 76-77. [GAO T. Discussion on up lift force of underground water in cohesive soil

- [C]// 2014 Conference of Jilin Society of Civil Engineering. Changchun: Jilin Society of Civil Engineering, 2014: 76–77. (in Chinese)]
- [15] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. [GONG X N. Soil mechanics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese)]
- [16] 王洪新. 水土压力统一计算理论的证明及水土共同作用下的压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (2): 392–398. [WANG H X. Verification of unified calculation theory of water and earth pressures and calculation of pressure under interaction of water and earth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (2): 392–398. (in Chinese)]
- [17] 李大鹏, 崔传安, 唐德高, 等. 基于充分浮力理论的有效应力原理公式推导[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39 (1): 24–30. [LI D P, CUI C A, TANG D G, *et al.* Derivation of the formula of effective stress principle based on theory of adequate rising force [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39 (1): 24–30. (in Chinese)]
- [18] WONG I H. Methods of resisting hydrostatic uplift in substructures[J]. Tunn Undergr Sp Technol, 2001, 16 (3): 77–86.
- [19] LADE P V, DE BOER R. The concept of effective stress for soil, concrete and rock[J]. Géotechnique, 1997, 47 (1): 61–78.
- [20] SINGH P N, WALLENDER W W. Effective Stress from Force Balance on Submerged Granular Particles [J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7 (3): 186–193.
- [21] CHARLEY R C, STEVENS E, SHETH N. Suggested test method for determination of degree of saturation of soil samples by B value measurement[J]. Geotech Test J, 1979, 2 (3): 158–162.
- [22] BRAJA M D. Advanced soil mechanics[M]. 3rd ed. New York: Taylor & Francis, 2009.

编辑:张明霞

(上接第 80 页)

- [20] 蔡月梅, 蔡五田, 刘金巍, 等. 河南省某大型水源 地岩溶水水化学及同位素特征[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 41–47. [CAI Y M, CAI W T, LIU J W, *et al.* Chemical and isotopic characteristics of the karst groundwater in the wellfield in Henan Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45 (5): 41–47. (in Chinese)]
- [21] XING M, LIU W. Using dual isotopes to identify sources and transformations of nitrogen in water catchments with different land uses, Loess Plateau of China [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2016, 23(1): 388.
- [22] CRAIG H. Isotopic Variations in Meteoric Waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702–1703.
- [23] CAO Y, TANG C, SONG X, *et al.* Characteristics of nitrate in major rivers and aquifers of the Sanjiang Plain, China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(10): 2624–2633.
- [24] GILLHAM R W, CHERRY J A. Field evidence of denitrification in shallow groundwater flow systems [J]. Water Pollut Res J Can, 1978, 13(1): 53–71.
- [25] DESIMONE L A, HOWES B L. Nitrogen transport and transformations in a shallow aquifer receiving wastewater discharge: A mass balance approach[J]. Water Resources Research, 1998, 34 (2): 271–285.
- [26] 吴耀国. 地下水环境中反硝化作用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3 (3): 27–31. [WU Y G. Denitrification in groundwater environment [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Treatment, 2002, 3 (3): 27–31. (in Chinese)]
- [27] 贺国平, 刘培斌, 慕星, 等. 永定河冲洪积扇地下水中硝酸盐来源的同位素识别[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 582–588. [HE G P, LIU P B, MU X, *et al.* Isotope identification of nitrate sources in groundwater of Yongding river alluvial diluvial Fan [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (4): 582–588. (in Chinese)]
- [28] PHILLIPS D L, NEWSOME S D, GREGG J W. Combining Sources in Stable Isotope Mixing Models: Alternative Methods[J]. Oecologia, 2005, 144(4): 520–527.

编辑:张若琳